

**В.М. СЕМЕНОВ, А.Ю. ДЕНЬЩИКОВ,
С.В. ПОДЛЕСНЫЙ**

**СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ
ВИБРАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ**

Донбасская государственная машиностроительная академия

**В.М. СЕМЕНОВ, А.Ю. ДЕНЬЩИКОВ,
С.В. ПОДЛЕСНЫЙ**

**СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ
ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Краматорск, 2012

УДК
ББК
Д 76

Рецензенты:

В.М. Семенов, А.Ю. Деньщиков, С.В.Подлесный

Снижение остаточных напряжений в элементах конструкций методом
вибрационной обработки – Краматорск: ДГМА, 2012. – 150 с.

ISBN

Изложены вопросы теории и технологии процесса виброобработки, результаты экспериментальных исследований. Рассмотрены методы контроля остаточных напряжений, контроля и управления процессом вибрационной обработки. Изучен опыт внедрения технологии виброобработки в производстве.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников машиностроительной отрасли, студентов и аспирантов машиностроительных специальностей вузов.

УДК
ББК

ISBN

© В.М. Семенов,, А.Ю. Деньщиков, С.В.Подлесный, 2012
© ДГМА, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел 1. Состояние вопроса о вибрационной обработке машиностроительных изделий для снижения остаточных напряжений	7
1.1. Анализ источников возникновения остаточных напряжений	7
1.2. Способы снижения остаточных напряжений	10
1.3. Теоретические методы определения остаточных напряжений	13
1.4. Экспериментальные исследования процесса вибрационной обработки с целью снижении остаточных напряжений	17
1.5. Методы контроля величины остаточных напряжений	19
1.6. Металлофизические представления о механизме вибрационного старения	25
1.6.1. Теоретические представления о механизме вибрационного старения	26
1.6.2. Реологические модели, описывающие механизм вибрационного старения	32
Раздел 2. Механическая модель вибрационной релаксации остаточных напряжений в металлах	36
2.1. Обоснование выбора математической модели	36
2.2. Условия возникновения скольжения и длительной релаксации	44
2.3. Влияние параметров механической модели на скорость релаксации	46
2.4. Анализ свойств механической модели	48
Раздел 3. Виброобработка стержневых элементов	51
3.1. Описание экспериментальной установки	51
3.2. Описание и проверка точности измерительных систем	53
3.3. Проведение экспериментальных исследований	57
Раздел 4. Изучение влияния вибрационной обработки на деформации сварных конструкций	60
4.1. Влияние вибрационной обработки на размерную стабильность балки коробчатого сечения	60
4.2. Сварочные деформации в корпусах редукторов	63
4.3. Замена термической обработки вибрационной при сварке клапанов горячего дутья	65

4.4. Снижение короблений после сварки методом вибрационного старения	69
4.4.1. Виброобработка конструкции в свободном состоянии	69
4.4.2. Виброобработка конструкций с использованием дополнительных приспособлений	72
Раздел 5. Влияние виброобработки на величины напряжений в сварных конструкциях	76
5.1. Снижение напряжений в балках двутаврового поперечного сечения	76
5.2. Сравнительная оценка влияния вибро и термообработки на остаточные напряжения в тавровой балке	84
5.3. Влияние виброобработки на остаточные напряжения в опоре свода доменной печи	89
5.4. Изучение напряжений на корпусах редукторов	92
5.5. Изучение напряжений на ригеле бурового оборудования	98
Раздел 6. Проведение вибрационной обработки конструкций с контролем по косвенным признакам	105
6.1. Конструкции типа «большой» и «малый» балансиры	105
6.2. Замена термической обработки узлов МВ-1500-00.02.000 «Балка моста» вибрационной обработкой	111
Раздел 7. Исследование влияния вибрационного старения на комбинированные литейно-сварные детали	121
Раздел 8. Проведение вибрационной обработки изложниц	127
Список использованных источников	133

ВВЕДЕНИЕ

От уровня остаточных напряжений в значительной мере зависят стабильность геометрической формы и размеров готовой продукции, прочность и долговечность элементов машин при эксплуатации. Для снижения уровня остаточных напряжений в машиностроении чаще всего используются традиционные технологические процессы – низкотемпературный отжиг и естественное старение. При этом методы вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений (вибрационного старения), по сравнению с термическим методом, применяются очень редко. Между тем, опыты по внедрению вибрационного старения на ряде предприятий свидетельствует о снижении расходов энергоресурсов более чем в 500 раз и сокращении технологического цикла операции снижения остаточных напряжений в 50–60 раз.

Главной причиной сдержанности темпов внедрения в производство метода вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений является отсутствие надежных расчетных методов для выбора рациональных параметров вибрационной обработки для релаксации остаточных напряжений в процессе вибрационной обработки изделий. Остаются неопределенными оптимальные условия закрепления, точка приложения и величина возмущающей силы, время обработки изделий. В настоящее время эти вопросы решаются на основании экспериментальных исследований, что зависит от личного опыта экспериментатора, при ошибках которого обработка оказывается недостаточно эффективной и часто приводит к негативному результату (образование трещин, разрушение конструкций).

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

1.1. Анализ источников возникновения остаточных напряжений

При изготовлении металлических конструкций под влиянием различных технологических операций, вызывающих изменения в металле, возникают остаточные напряжения [1; 2]. В некоторых случаях остаточные напряжения создаются преднамеренно для улучшения качественных характеристик изделия (поверхностный наклеп, автофретирование, химико-термическая обработка), но в ряде случаев, например при литье, сварке, возникающие внутренние напряжения, наоборот, снижают стабильность изделия. В этом случае в течение времени из-за перераспределения и релаксации остаточных напряжений теряется стабильность геометрических размеров деталей [1–6]. Это происходит потому, что в процессе релаксации происходит перераспределение упругих и пластических деформаций, вследствие чего величины остаточных напряжений изменяются. Неравномерность протекания в металле этого процесса нарушает равновесное состояние, вызывая деформацию детали с изменением ее геометрической формы. Повышение стабильности геометрических размеров достигается преимущественно за счет снижения внутренних остаточных напряжений и микропластических деформаций в материале детали.

Современный уровень развития технологии производства позволяет при решении конкретных задач выбрать рациональный процесс изготовления. Однако ни конструктивными, ни технологическими приемами невозможно полностью устранить причины, вызывающие остаточные напряжения.

Напряжения, возникающие в результате воздействия высокой температуры. К этому классу отнесены напряжения, возникающие

при закалке, а также остаточные напряжения, возникающие в цельнолитых конструкциях при остывании после отливки.

Остаточные напряжения образуются в случае неравномерного нагрева по сечению детали. При быстром охлаждении детали наружные ее слои, охлаждающиеся быстрее, будут растянуты. Сердцевина под действием более холодных слоев будет сжата. Если в этот момент возникающие напряжения окажутся выше предела пропорциональности при данной температуре, то произойдет пластическая деформация [5; 7–10]. Возможен случай, когда температурные напряжения в наружных слоях превысят предел прочности металла и образуется трещина («горячая трещина»).

Напряжения после сварки. Сварные конструкции состоят из большого числа элементов и сварных швов, внутренние напряжения которых взаимодействуют и могут распределяться различным образом. Последовательность приварки и жесткость элементов существенно влияют на остаточные напряжения.

Характерными особенностями сварки являются ее локальный характер, высокие скорости нагрева до температур, превышающих температуры плавления металла (3000 °С при газовой и 4000 °С при электродуговой сварке). Данные причины вызывают температурные напряжения, неоднородные структурные преобразования в шве и зонах термического влияния, окружающих сварной шов.

Объем зоны распределения остаточных напряжений зависит от мощности и продолжительности нагрева, а также от структурных превращений, происходящих в зоне, непосредственно примыкающей к сварному шву [11; 12].

Вследствие структурных превращений изменяется плотность материала в зоне сварного шва. Это связано с тем, что при нагреве переход перлита и феррита в аустенит сопровождается уменьшением плотности, а при охлаждении – превращение аустенита в мартенсит сопровождается увеличением плотности. Кроме того, вследствие неравномерного охлаждения деталей структурные превращения во всем объеме происходят не одновременно, и по мере охлаждения всего сечения распределение напряжений изменяется. В низкоуглеродистых сталях распад аустенита при остывании происходит при температуре 600 °С и мало влияет

на остаточные напряжения. При этом в легированных сталях во время остывания распад аустенита происходит при более низких температурах, когда металл находится в твердом состоянии и вызывает остаточные напряжения. Таким образом, величина остаточных напряжений, вызванных фазовыми превращениями, зависит от химического состава стали [3; 13; 14].

Напряжения после пластической деформации. Остаточные напряжения возникают в результате неоднородной пластической деформации в различных технологических процессах (ковка, штамповка, прокатка). Пластическое формоизменение может производиться при нормальной и высокой температурах.

Величина остаточных напряжений, возникающих в результате обработки давлением при низкой температуре, зависит от величины и размеров зоны пластического деформирования [15; 16].

Напряжения после механической обработки. Механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование и т. д.), как правило, вызывает появление в тонком (десятые доли миллиметра) поверхностном слое значительных остаточных напряжений.

Источником появления остаточных напряжений при механической обработке является одновременное действие следующих факторов [17–19]:

1. Неравномерная пластическая деформация поверхностного слоя. В зоне перед инструментом материал сжимается передней поверхностью инструмента, а в зоне за ним при трении поверхности инструмента об обработанную часть конструкции – растягивается. Границей раздела этих зон является режущая кромка инструмента.

2. Локализованный нагрев тонких поверхностных слоев вследствие работы деформации и трения приводит к большим температурным напряжениям, превосходящим предел текучести материала. После остывания детали в поверхностном ее слое появляются значительные растягивающие остаточные напряжения.

Влияние указанных факторов, действующих в противоположных направлениях, приводит к тому, что остаточные напряжения при механической обработке существенно зависят от технологических режимов (геометрия и состояние режущего инструмента, охлаждающая

среда, вид и режим обработки). Кроме того, остаточные напряжения в этом случае зависят от материала изделия.

1.2. Способы снижения остаточных напряжений

Естественное старение. Данный метод снижения остаточных напряжений в изделии заключается в следующем: конструкция после изготовления хранится на открытом воздухе, подвергаясь изменениям температуры окружающей среды, вызывающим температурные деформации всех элементов конструкции. Этот процесс весьма продолжителен и может продолжаться один – два года и дольше [20].

Важным свойством естественного старения является повышение сопротивления материала пластическому деформированию за счет происходящей в течение длительного времени межкристаллитной эрозии. Самый существенный недостаток естественного старения – большая его продолжительность, необходимость создания сверхнормативных запасов заготовок и дополнительных площадей.

Термическая обработка (отжиг). На сегодняшний момент это основной метод, применяемый в промышленности [1; 11; 21]. Он представляет собой тепловой процесс снятия напряжения, при котором изготовленная стальная конструкция помещается в печь и температура поднимается до 200...600 °С. Эта температура поддерживается в течение определенного времени, затем постепенно уменьшается. При этом уменьшается внутренняя энергия искажения решетки матрицы при переходе растворенных атомов в район дислокации, а также энергия самой дислокации. Кроме того, за счет резкого повышения пластичности металлической матрицы происходит снижение остаточных напряжений не только в местах их концентрации, но и по всему объему материала [7; 9]. Поэтому при низкотемпературном отжиге получается значительное снижение остаточных напряжений, однако здесь наблюдается резкое уменьшение напряжений только в местах их концентрации. Снижение напряжений в других местах является в данном случае лишь сопутствующим процессом, не оказывающим существенного влияния на

последующую стабилизацию. С повышением температуры скорость релаксации напряжений увеличивается, поэтому напряжения при низкотемпературном отжиге снижаются значительно больше, чем при естественном старении [12].

Менее продолжительный, чем метод естественного старения, этот метод также требует значительного времени для завершения процесса в полном объеме.

Деформационное старение – группа методов, основной принцип которых заключается в статическом или циклическом нагружении. При этом напряжения, возникающие в изделии, суммируются с остаточными и вызывают пластическую деформацию, вследствие чего уменьшаются исходные остаточные напряжения. Изменение остаточных напряжений, как при статическом, так и при циклическом нагружении, является следствием релаксационного процесса, а в некоторых случаях – упругого последствия [22].

Наибольшее распространение получили такие методы деформационного старения, как *статическая перегрузка* и *вибрационное старение*.

Метод статической перегрузки заключается в приложении к изделию продолжительной концентрированной или распределенной нагрузки необходимой величины, которая создает напряжения, совпадающие по направлению с максимальными остаточными напряжениями, но имеющие противоположный знак. При этом нагрузка может быть как одноразовой, так и циклической [23; 24].

Вибрационное старение – получивший распространение в последние десятилетия малоэнергоёмкий способ стабилизации геометрических размеров металлоконструкций [23; 25].

Сущность способа заключается в создании в металлоконструкции после окончательной сборки или в процессе изготовления переменных напряжений определенной величины с помощью специальных вибровозбудителей (вibrаторов). Возникающие при виброобработке переменные напряжения суммируются с остаточными, вследствие чего возникает явление вибропластичности, которое способствует снижению и перераспределению напряжений [26–29]. Пластическая деформация,

сопровождающая циклическое нагружение, приводит к упрочнению материала и перераспределению остаточных напряжений.

Процесс вибрационного старения можно назвать ускоренным естественным старением, при котором металлические изделия испытывают воздействие слабого термического цикла и хаотических вибраций от случайных источников. При вибрационном старении за короткие промежутки времени создается множество циклов нагружения на заданных и контролируемых амплитудах и частотах, что обеспечивает завершение стабилизации в течение нескольких минут [30].

Вибрационное старение является высокопроизводительным методом снижения остаточных напряжений, который пригоден для сборных, литых, кованных, сварных и горячекатаных конструкций из черных и цветных металлов [30–51]. При этом параметры прочности, твердости и долговечности не снижаются. Кроме того, вибрационное старение применимо к конструкциям любых габаритных размеров и массы, а оборудование, необходимое для его осуществления, является весьма простым и малогабаритным.

Потенциальные экономия времени, оборудования и затрат энергии существенны. Отсутствие многих побочных эффектов (например, деформирования и деградации механических свойств), сопровождающих тепловое снятие напряжения, делает процесс еще более привлекательным.

Сравнение технико-экономических показателей различных методов приведено в таблице 1.1 [23; 26; 52–54].

В настоящее время в основном определились области применения вибрационной обработки [55]:

1) виброобработка в процессе остывания заготовок и сварных узлов при литье и сварке с вибрацией [28] с целью повышения качества готового изделия;

2) виброобработка закаленных сталей с целью стабилизации неравновесных структур;

3) вибрационная правка деталей;

4) виброобработка сварных металлоконструкций с целью повышения стойкости к трещинообразованию;

5) стабилизирующая вибрационная обработка в промежутке между операциями механообработки с целью снижения припусков;

б) виброобработка деталей и конструкций с целью обеспечения стабильности форм и размеров в процессе эксплуатации.

Таблица 1.1

**Технико-экономические показатели методов старения
по сравнению с низкотемпературным отжигом**

	Время обработки, %	Стоимость старения, %	Энергозатраты, %	Снижение уровня $\sigma_{ост} / \sigma_{max}$
Низкотемпературный отжиг	100	100	100	30...65
Статическая перегрузка	1...3	10...20	1...2	10...40
Вибрационное старение	2...5	10...20	1...2	15...5
Ускоренный отжиг	10...20	50...70	35...45	70
Естественное старение	3000... 18000	20...50	—	15...30

1.3. Теоретические методы определения остаточных напряжений

В связи с тем что для расчета процесса релаксации остаточных напряжений необходимо знать их первоначальное распределение, возникла необходимость изучения методов определения остаточных напряжений. Так как в последующих разделах будут рассмотрены металлические конструкции изготовленные при помощи сварки, то далее рассмотрены методы определения остаточных напряжений возникающих после сварки.

Графоаналитические методы. Данная группа приближенных методов основывается на предположении о возможности замены действительного процесса развития деформаций при сварке деформациями от приложения некоторой фиктивной силы. Эта фиктивная сила должна быть подобрана так, чтобы расчетные деформации были равны

действительным деформациям, возникающим при сварке. Общую идею наиболее распространенных методов Н. О. Окерблома, Г. А. Николаева, К. М. Галентовского [56] можно описать следующим образом: в окрестностях сварного шва задается некоторое поле температурных напряжений, которое моделирует процесс нагревания металла в процессе сварки. Применяя теорему о разгрузке, находят остаточные напряжения после сварки. Различие в этих методах заключается в количестве точек, в которых задается распределение температуры, и методах схематизации диаграммы растяжения-сжатия.

К недостаткам следует отнести то, что рассматриваемая задача считается одноосной, то есть считается, что в сечении свариваемой конструкции возникают только напряжения σ_z , где z – ось, параллельная сварочному шву.

Методы упругих решений. Значительное место в исследовании сварочных деформаций и напряжений отводится упругим решениям. Они могут явиться первым приближением точного упругопластического решения.

Упругое решение, найденное для случая остывания неравномерно нагретого тела, когда начальное состояние тела перед остыванием можно рассматривать как ненапряженное, дает качественную картину распределения остаточных напряжений, в некоторых случаях достаточную для правильных суждений о характере поля напряжений [168].

Упругие решения, конечно, не дают совершенно полного и правильного отражения реальной картины распределения напряжений и деформаций при сварке, если в действительности развиваются пластические деформации. Степень неточности в каждом конкретном случае различна, но она может быть допустимой для ряда практических задач [58; 59].

Таким образом, задача нахождения остаточных напряжений в сварном соединении может быть решена как задача теории упругости [60; 61] с привлечением экспериментальных данных, найденных для отдельных точек сварного соединения [60]. Применяя определенные аппроксимирующие зависимости, условия совместности деформаций и дифференциальные уравнения равновесия, можно определить остаточные

напряжения. Следует отметить, что точность вычисляемых остаточных напряжений в первую очередь зависит от соответствия принятых в расчете функций распределения деформаций истинному характеру их распределения в рассматриваемом случае сварки.

Метод Г. Б. Тальтова. Основным допущением данного метода [61] является положение, что «каждый металл теряет свою способность сопротивляться пластическим деформациям в определенном для него достаточно узком интервале температур». Для дальнейшего упрощения считается, что это происходит при определенной средней в этом интервале температуре T_k . Иными словами, $\sigma = \sigma_T$ при температурах $T \geq T_k$. Границы зоны, где металл нагревался до $T = T_k$, определяются расчетом поля температур от движущегося источника теплоты при сварке.

Значительно влияет на точность расчетов допущение, которое заключается в том, что расчет проводится сразу для стадии остывания, а процессы образования деформаций и напряжений на стадии нагрева не рассматриваются. Причем процессы перераспределения тепловых потоков и изменения температур в этот период не учитываются; считается, что области, в которых температура была ниже T_k , имеют все время начальную нормальную температуру T_0 и перед началом остывания свободны от каких-либо напряжений.

Таким образом, принимается, что причиной образования остаточных деформаций и напряжений является исключительно температурное сокращение зоны, где температура была выше T_k . Температурная деформация этой зоны принимается равным $\alpha(T_k - T_0)$.

Основное преимущество этого метода заключается в его способности рассматривать неодноосные задачи на базе аппарата теории упругопластических деформаций. Главный недостаток метода связан с принятой предпосылкой, согласно которой процесс образования пластических деформаций при нагреве не рассматривается. Между тем в ряде случаев в двухосных задачах пластические деформации, образующиеся при нагреве, существенно различаются по разным направлениям.

Метод В. С. Игнатъевой. В данном инженерном расчетном методе предполагается мгновенная укладка шва по всей длине [62]. Расчету

остаточных деформаций и напряжений предшествует определение временных деформаций и напряжений на стадии нагрева. В качестве момента времени t_p для их расчета принимается такой, когда наибольшая температура в какой-либо точке шва равна T_p . Температура T_p – это температура перехода из состояния, когда металл имеет весьма низкий предел текучести и не способен сопротивляться пластической деформации, в состояние резкого возрастания предела текучести. Следовательно, температура T_p совпадает с температурой T_k в предыдущем методе. При распределении температур, соответствующих моменту времени t_p , методами теории упругости определяются временные условные напряжения. По величине интенсивности вычисленных напряжений σ_i определяется граница области развития пластических деформаций с учетом зависимости предела текучести металла от температуры. Вычисляются сами компоненты пластических деформаций на основе теории упругопластических деформаций. Поле найденных пластических деформаций в момент времени t_p является полем начальных пластических деформаций, по которым затем для нормальной температуры тела определяются остаточные деформации и напряжения.

Поле начальных деформаций, которое в общем случае может оказаться довольно сложным по распределению компонентов, для наглядности и простоты заменяется некоторым полем «фиктивных температур». Последнее представляет собой сумму температурных полей от совокупности воздействий фиктивных источников и стоков теплоты различной протяженности и формы. Остаточные напряжения представляют как температурные напряжения фиктивного поля температур.

Если напряжения превзойдут предел текучести металла, то приближенно по полю деформаций определяются пластические деформации и напряжения, соответствующие конечному остаточному состоянию. Расчет их ведется по теории упругопластических деформаций.

Для этого метода характерно то, что определяются (хотя и приближенно) деформации и напряжения на стадии нагрева, которые служат отправной информацией для вычисления поля остаточных напряжений и деформаций. Точность данного метода может быть

повышена, если в расчет остаточных напряжений вводить начальные пластические деформации в том виде, как они получены при $t = t_p$, без замены их фиктивными полями температур.

1.4. Экспериментальные исследования процесса вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений

Впервые идея о том, что, вводя колебания в кристаллизирующийся металл, можно добиться существенного улучшения комплекса его свойств, была высказана Д. К. Черновым в 1869 году [63]. Спустя 16 лет, были проведены опыты по промышленному применению виброобработки [64]. Однако при этом не проводилось серьезных научных исследований, и поэтому вибрационная обработка достаточно долго применялась на небольшом числе предприятий [65]. Разработку и внедрение методов вибрационного старения, в первую очередь, связывают с работами R. Claxton, A. Rappen, G. Wozney, G. Crawler, L. Thompson [66–70]. На территории бывшего СССР пионерами в данном направлении принято считать О. Ю. Коцюбинского, Г. Г. Адояна, А. М. Герчикова, Э. Ч. Гини, К. М. Рагульскиса, В. М. Сагалевича [8; 20; 25; 71–74]. Исследования, проведенные этими авторами, включают самые различные испытания от экспериментов на простых образцах с остаточными напряжениями, вызванными упрочняющей обработкой или пластической деформацией изгиба до испытаний на литых и сварных изделиях.

Однако при всей масштабности исследования, проведенные вышеупомянутыми авторами, направлены, в первую очередь, на подтверждение факта вибрационного старения. В них практически не проводился анализ полученных результатов, а иногда величины остаточных напряжений не измерялись вообще [71]. Авторы судили о наличии или отсутствии напряжений, исходя из изменения величины коробления конструкции. Делался вывод, что так как коробление конструкции обуславливается процессом образования остаточных напряжений, то прекращение изменения величины коробления под воздействием вибрации свидетельствует об окончании процесса изменения

величины остаточных напряжений и о полном, или весьма значительном, снятии напряжений (не менее чем на 65 %) [72]. Но, как показала практика, снижение остаточных напряжений в реальных конструкциях значительно ниже [23; 55; 75–77], хотя и были зафиксированы случаи снижения напряжений до 85 % [52].

Изначально виброобработка проводилась на фиксированной частоте, далекой от резонансной частоты изделия. При применении нерезонансного метода, из-за того что амплитуда действующих напряжений, создаваемых источником вибрации, мала, скорость процесса релаксации невелика. Поэтому виброобработка продолжалась несколько часов и эффект от нее мог быть непредсказуем: в ряде случаев вообще не было зафиксировано снижение напряжений [66], кроме того, известны случаи разрушения конструкций [72].

Только после целого ряда работ, доказавших, что вибрационная обработка на резонансных частотах не дает отрицательных эффектов [71–81] и не затрагивает таких свойств, как показатели усталостной прочности [23; 52; 53; 65; 66; 74; 89–93], а также не вызывает явлений трещинообразования [94–96], нерезонансный метод вибрационной обработки был окончательно вытеснен. Хотя первые удачные эксперименты по применению резонансного метода были проведены еще в первой половине 70-х годов XX века [37; 38], достаточно продолжительное время резонансный и нерезонансный методы существовали одновременно.

Известны [53; 54; 97–101] экспериментальные исследования, проведенные на балках прямоугольного поперечного сечения. Остаточные напряжения были созданы наплавкой металла либо на одну из поверхностей, либо на одно из ребер балки. Резонансные колебания с частотой, равной первой собственной частоте, возбуждались таким образом, чтобы напряженное состояние было близко к чистому изгибу.

В этих работах была прослежена нелинейность в скорости снижения остаточных напряжений [54; 97; 98], замечено, что уменьшение остаточных напряжений максимально в течение первых циклов, впоследствии снятие напряжений на такую же величину происходит в течение последующих сотен циклов. При этом скорость изменения остаточных напряжений пропорциональна величине остаточных и амплитуде действующих напряжений [54; 97; 99]. Был сделан вывод о том, что оптимальные

продолжительность и уровень вибрационных нагрузок не повлияли на прочность соединений, а временное сопротивление и предел текучести даже несколько повысились. При этом предел выносливости сварных соединений (стыковых, угловых, нахлесточных) не понизится [54; 98; 100–112].

Кроме того, доказано, что «остаточные напряжения могут снижаться при суммарном напряжении, меньшем предела текучести материала. Тем не менее многие авторы впоследствии придерживались мнения о том, что для нормального протекания процесса вибрационного старения необходимо достижение в материале исследуемого изделия суммарных напряжений не менее предела текучести.

Несомненную практическую ценность представляют полученные рядом авторов кривые зависимости остаточных напряжений от количества циклов нагружения и амплитуды действующих напряжений, создаваемых источником вибрации [53; 101; 113–116]. В этих работах не только отмечается нелинейный характер изменения остаточных напряжений от количества циклов, но и прослеживается влияние на эту нелинейность различных факторов. Полученные зависимости представлены на рис. 1.1.

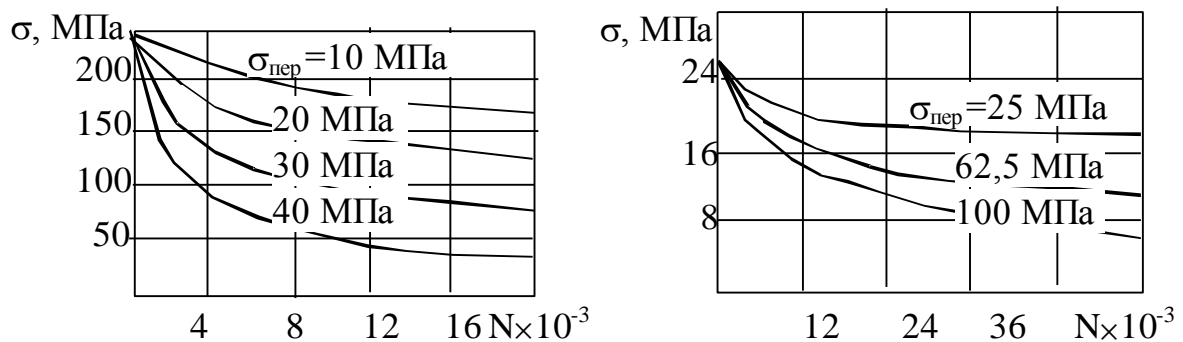


Рис. 1.1. Зависимости остаточных напряжений в образцах от числа циклов и амплитуды переменных напряжений.

1.5. Методы контроля величины остаточных напряжений

В основе существующих методов определения внутренних напряжений лежит исследование физических свойств материалов при воздействии на них рентгеновских, инфракрасных, ультрафиолетовых и

гамма-лучей, радиоволн, ультразвуковых колебаний, магнитного и электростатического полей и др. Основными методами, применяемыми в настоящее время, являются рентгенографический, ультразвуковой и магнитные методы.

Ультразвуковые методы основаны на упруго-акустическом эффекте, который заключается в существовании зависимости между скоростями распространения ультразвуковых волн малой амплитуды в твердом теле и напряжениями [117,118]. Такие соотношения, получаемые теоретически, составляют основу акустического метода определения в элементах металлоконструкций как рабочих, так и остаточных напряжений. Недостаток ультразвуковых методов происходит из самого принципа их работы, а именно: точность метода определяется точностью констант упругости второго и третьего порядков, которые устанавливаются экспериментально при известном напряженном состоянии контрольного образца в условиях одноосного и двухосного нагружений. Все это приводит к тому, что на практике при применении ультразвукового метода необходимо иметь эталонную деталь аналогичную исследуемой с известным напряженным состоянием. В случае отсутствия эталона точность метода достаточно низка и получаемая картина напряжений может вообще не соответствовать реальному распределению напряжений. При этом следует отметить, что в качестве дефектоскопов ультразвуковые приборы являются наиболее точными.

Рентгеновский метод является наиболее распространенным на практике и использует изменение спектра отраженных лучей, вызываемое изменением частоты колебаний узлов кристаллической решетки и изменением расстояний между узлами или кристаллографическими плоскостями [117]. Информативными параметрами рентгеновского метода являются: интенсивность, положение и ширина дифракционных пиков спектра, определяемые деформацией кристаллической решетки. Метод измерения абсолютный, т.е. он не требует калибровки образцов или заранее известных уровней напряжений. Точность этого метода, при определении величин остаточных напряжений III го рода, обычно находится в пределах 5-10%.

Недостатки данного метода:

1) Имеющееся оборудование, как правило, стационарное и может работать только с деталями малых размеров. Портативные рентгеновские аппараты, лишенные данного недостатка [44] (Streinflex, ПРИОН, XSTRESS 3000, Rigaku и т.д.) имеют высокую стоимость и распространены крайне мало.

2) Глубина проникновения рентгеновских волн вглубь детали не превышает несколько десятков микрон. Таким образом, контроль осуществляется только в поверхностном слое.

3) Требования к шероховатости металла контролируемой поверхности достаточно жесткие, поэтому поверхность, как правило, шлифуют, искажая имеющуюся картину распределения напряжений.

4) Рентгеновский метод измеряет деформация на микроуровне, создающая напряжения III-го рода. То же время на практике наибольший интерес представляют усилиям растяжения- сжатия, т.е. фактически по напряжения I-го рода. Все три рода напряжений неразрывно связаны между собой, но имеют не только существенно разные величины, но разный характер и, часто, разные знаки. Поэтому точность пересчета напряжений III го рода в усилия растяжения- сжатия в достаточно сильной степени зависит от квалификации исследователя.

Магнитные методы основаны на намагничивании контролируемого участка детали до технического насыщения накладным преобразователем, размагничивания его ступенчато нарастающим полем, фиксации магнитных характеристик (коэрцитивной силы, индукции, остаточной намагниченности, магнитной проницаемости) [117,119-123]. Существенным недостатком магнитного метода является его чувствительность к локальным изменениям толщины стенки, создающая дополнительные трудности в интерпретации результатов контроля. Кроме того, имеющиеся приборы не позволяют измерить величины напряжений в материалах типа чугунов, т.е. с низкой магнитной проницаемостью.

Достаточно часто, при проведении исследований по измерению внутренних напряжений, зависимость между изменением магнитной характеристики и величиной напряжений полагают линейной [119-123]. Проведено исследование по оценке степени достоверности результатов измерения внутренних напряжений, получаемых при таком подходе.

Для контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций магнитным методом использовался структуроскоп КРМ-Ц-К2М (разработчик и изготовитель – фирмы «Специальные Научные Разработки» г. Харьков).

Для проведения исследований изготовлены образцы прямоугольного поперечного сечения из различных сталей, которые нагружались одноосной силой на машине ГМС-100 с остановками для замеров. Измерение показаний приборов производилось через каждые 30 МПа. Производилось по три замера для каждой силы и вычислялось среднее значение коэрцитивной силы.

Результаты измерений представлены в виде таблицы 1.2.

Таблица 1.2.

Марка стали	Величина нагрузки (кН)/ напряжения в образце (МПа)									
	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>160</u>	
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	
Ст. 3	2,2	2,5	2,8	3,2	3,8	4,2	4,5	4,7	4,9	
09Г2С	3,4	3,8	4,6	5,4	5,9	6,3	6,7	7,0	7,3	
St 52-3	3,4	3,7	4,3	4,9	5,6	6,1	6,5	6,8	7,0	
10ХСНД	№ 1	2,8	3,1	3,6	4,2	4,9	5,3	5,7	6,0	6,3
	№2	3,7	3,8	4,4	5,2	5,7	6,2	6,6	6,9	7,3

По полученным значениям построены графики, представленные на рис.1.2. При этом вдоль горизонтальной оси откладывались действующие напряжения, вычисленные согласно формулы: $\sigma = P/F$, где P - величина растягивающей силы, F - площадь поперечного сечения образца. Вдоль вертикальной оси – показания коэрцитивной силы, А/см.

Как можно увидеть из полученных графиков, зависимость между значениями напряжений и коэрцитивной силой близка к линейной. Следует обратить внимание, что три кривые (для сталей 09Г2С, St 52-3 и 10ХСНД, образец 2) находятся очень близко друг относительно друга, а разница между показаниями коэрцитивной силы для двух образцов из одной стали 10ХСНД составляет около 20% при практически полном их совпадении при наложении.

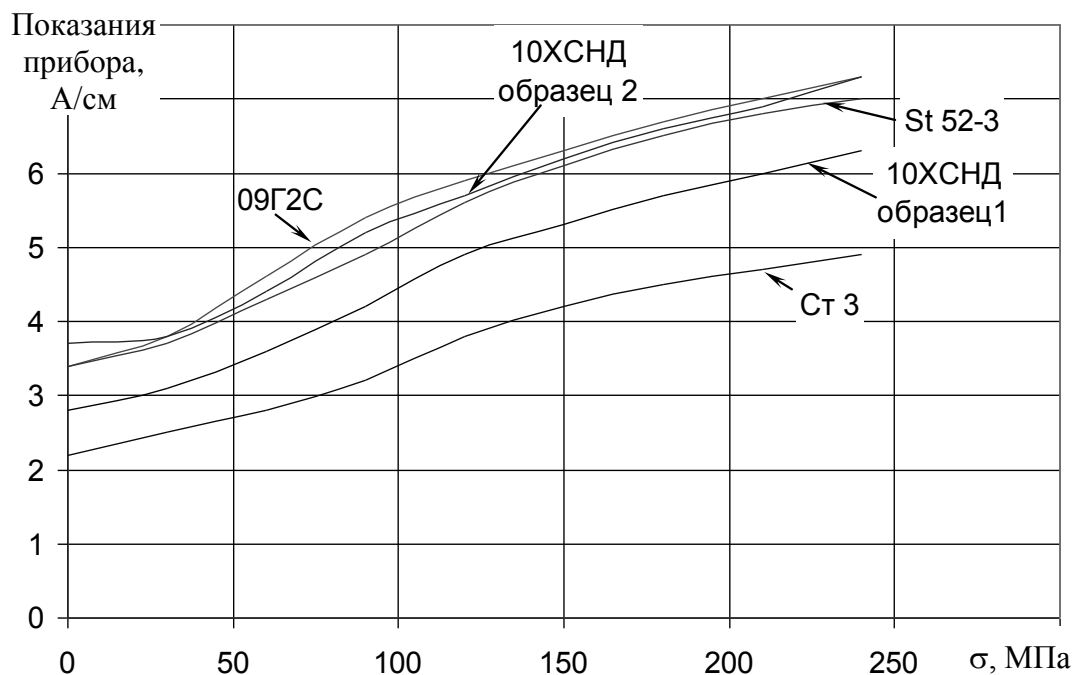


Рис. 1.2. Результаты измерений при тарировке

Такая ситуация объясняется тем, что на абсолютное изменение коэрцитивной силы влияют различные факторы, среди которых: температура и влажность окружающей среды, качество поверхности, структурные неоднородности и нарушения сплошности металла, и т.п.

Но для нас принципиально важным является то, что прибор качественно достаточно точно зафиксировал изменения внутренних напряжений во всех образцах.

Для оценки величины погрешности определения напряжений проведен был дополнительный анализ. Учитывая, что на каждом шаге значение напряжений изменялось на одинаковую величину (30 МПа), то может быть определен средний коэффициент пропорциональности K_m между изменением напряжений и показаний прибора. Тогда напряжения могут быть вычислены согласно формуле $\sigma = K_m \cdot \Delta P_k$, где ΔP_k - изменение величины коэрцитивной силы.

Как альтернативный метод, для второго образца применялся тензометрический метод измерения напряжений. При этом использовалась тензостанция ИДЦ-1, в качестве датчиков для измерения напряжений использовались проволочные тензорезисторы на пленочной основе 2ПКП-

30-200 с сопротивлением $199 \div 199,49$ Ом, активной базой 30 мм и известным коэффициентом тензочувствительности. Тензодатчики были подключены по несбалансированной мостовой схеме, симметричной относительно питающей диагонали.

После определения значений коэффициентов пропорциональности были вычислены изменения напряжений за один шаг измерений. Полученные значения представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3.

Нагрузка	Магнитным методом (образец 1/образец 2)			Методом тензометрии (образец 2)		
	Показания прибора	Разность		Показания прибора	Разность	
		А/см	МПа		ЕОД	МПа
0	2,8/3,7			1015		
30	3,1/3,8	0,3/0,1	20,28/6,76	1029	14	30,80
60	3,6/4,4	0,5/0,6	33,81/40,57	1043	14	30,80
90	4,2/5,2	0,6/0,8	40,57/54,09	1056	13	28,60
120	4,9/5,7	0,7/0,5	47,33/33,81	1068	12	26,40
150	5,3/6,2	0,4/0,5	27,04/33,81	1082	14	30,80
180	5,7/6,6	0,4/0,4	27,04/27,04	1095	13	28,60
210	6/6,9	0,3/0,3	20,28/20,28	1109	14	30,80
240	6,3/7,3	0,3/0,4	20,28/27,04	1123	14	30,80

По полученным данным были построены графики изменения напряжений. При этом вдоль горизонтальной оси откладывались значения действующих напряжений, вдоль вертикальной – расчетное изменение напряжений согласно показаниям приборов при изменении напряжений на 30 МПа. Таким образом, погрешность определения напряжений может быть определена как разность, между вычисленным значением и действительным изменением напряжений (30 МПа). Сплошными линиями показаны результаты измерений, полученные при помощи метода магнитной индукции, штриховой – тензометрии.

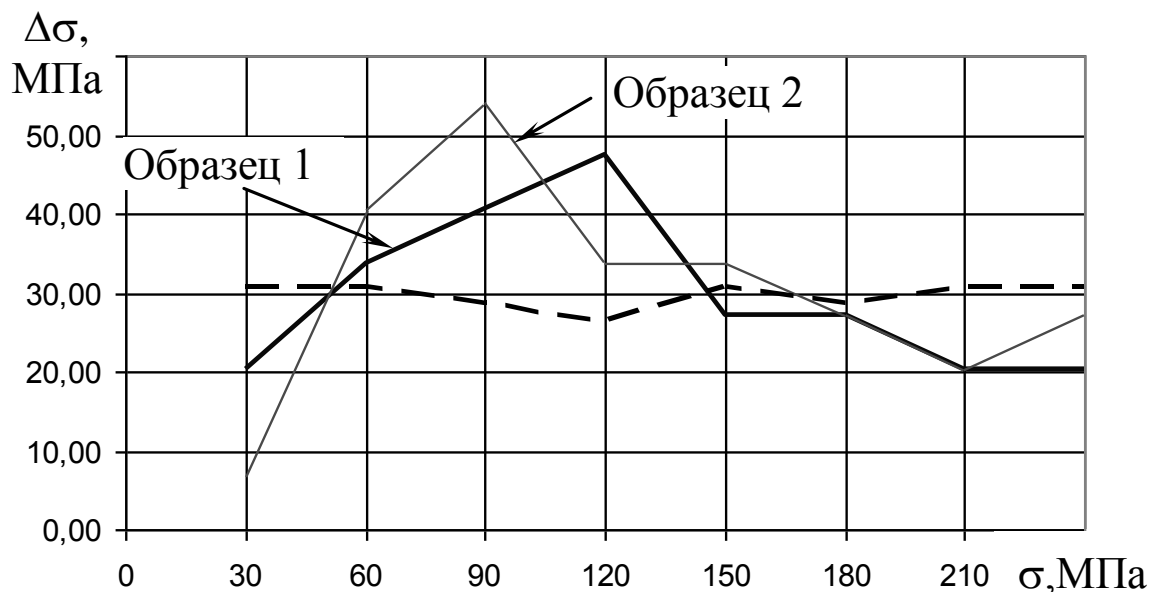


Рис. 1.3. - Погрешность измерений при тарировке

Как можно увидеть используемая аппаратура показывает удовлетворительные результаты при высоком уровне напряжений (для данного материала выше 120 МПа), при этом для низких остаточных напряжений погрешность может составлять порядка 60%.

1.6. Металлофизические представления о механизме вибрационного старения

Рассмотрим теоретические представления о процессах, происходящих в материале конструкции при вибрационном старении, влиянии внутренней структуры на напряженно-деформированное состояние. Эти сведения, а также описание моделей, предложенных разными авторами для описания этих процессов, представлены в настоящем подразделе.

1.6.1. Теоретические представления о механизме вибрационного старения

В основе теории, описывающей механизм вибрационного старения, лежит предположение о том, что пластическое течение имеет волновой характер. Механизм вибростарения в локальных зонах объясняется следующим образом. Остаточные напряжения образуются в кристаллических телах как результат пластической деформации кристаллов [124–126]. Для стабилизации напряженного состояния детали сообщается некоторый энергетический импульс, например энергия колебаний при вибростарении. Возникающие при этом дополнительные напряжения суммируются с начальными остаточными, в результате чего в поликристаллическом материале происходят сдвиги кристаллической решетки. Данный процесс сопровождается перераспределением напряжений, а молекулы приходят в равновесное положение. Напряжения в пределах зерен и по их границам уменьшаются [127].

Изменение свойств металла в локальных объемах обуславливает процессы упрочнения, протекающие при пластической деформации металлов и деформационном старении, характерном для железоуглеродистых сплавов. Известно, что упругие деформации существенно ускоряют процесс деформационного старения. Таким образом, при пластическом деформировании происходят генерация дислокаций, повышение их плотности, сопровождающиеся блокированием свободных дислокаций атомами углерода и азота. Одновременно уменьшаются напряжения в локальных зонах, и они тем заметнее, чем выше степень пластической деформации. Однако ввиду локальности протекания процесса в зонах концентрации напряжений общий уровень напряжений первого рода изменяется незначительно, и напряжения могут быть стабилизированы при достаточно высоком их конечном уровне [23].

Первым предположение о волновом характере пластического течения было высказано академиком Иоффе в серии работ, опубликованных в сборнике избранных трудов [128], где он показал, что текучесть состоит из ряда малых элементарных пластических сдвигов либо между отдельными кристаллическими зернами, либо внутри одиночных кристаллов. Причем любые два последовательных сдвига отделены друг от

друга промежутками времени, длительность которых строго постоянна в данных условиях. Было отмечено, что пластическое течение состоит из скольжения и вращения зерен друг относительно друга. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что пластическая деформация развивается скачками. Их частота увеличивается с ростом приложенной нагрузки.

Таким образом, процесс пластической деформации рассматривается как совокупность равновесных состояний, в которых может находиться тело. При этом деформируемый кристалл осуществляет пластическое течение, перестраиваясь эстафетно между двумя смежными структурами [129]. При этом считается, что пластическая деформация – это совокупность последовательно протекающих элементарных релаксационных актов, в ходе которых в области концентраторов напряжений зарождаются сдвиги. Следствием этого является локальное снижение напряжений [127]. Возникновение прерывистости течения (эффект Портевена – Ла Шателье) на кривых монотонной деформации объясняется переходом материала в автоколебательный режим [130; 131]. В отдельных кристаллитах в результате работы концентраторов напряжений возникают сдвиги по плоскостям скольжения. К концу стадии микропластичности их поведение становится взаимно коррелированным, так что один сдвиг вызывает появление следующего. В результате развития множественного скольжения формируется волна пластической деформации [131]. Эта волна представляет собой пространственно-временную структуру, отражающую процессы самоорганизации диссипативных систем, и состоит из трансляционных и ротационных компонент [132].

При этом установлено, что в силу того что атомы в области дислокаций находятся в неустойчивом равновесии, для их смещения достаточно возникновения касательных напряжений значительно более низких, чем напряжения, необходимые для смещения дислокации поперек решетки до следующего торможения решетки или до границы зерна. Поэтому условием, при котором происходит пластический сдвиг, является не достижение напряжения, близкого к пределу текучести, а накопление кинетической энергии, необходимой для преодоления потенциального барьера [133].

В силу вышесказанного, выбор значений напряжений, возникающих в процессе вибрации, и числа циклов нагружения, от которых зависят качество виброобработки и долговечность изделия, предлагается производить на графике в координатах «циклическая нагрузка – число циклов» или на диаграмме усталости (рис. 1.4.) [134], где:

- 1 – начало микроскопического течения;
- 2 – макроскопическое течение;
- 3 – линия окончания микроскопического течения;
- 4 – линия начала образования субмикроскопических трещин;
- 5 – кривая усталостного разрушения;

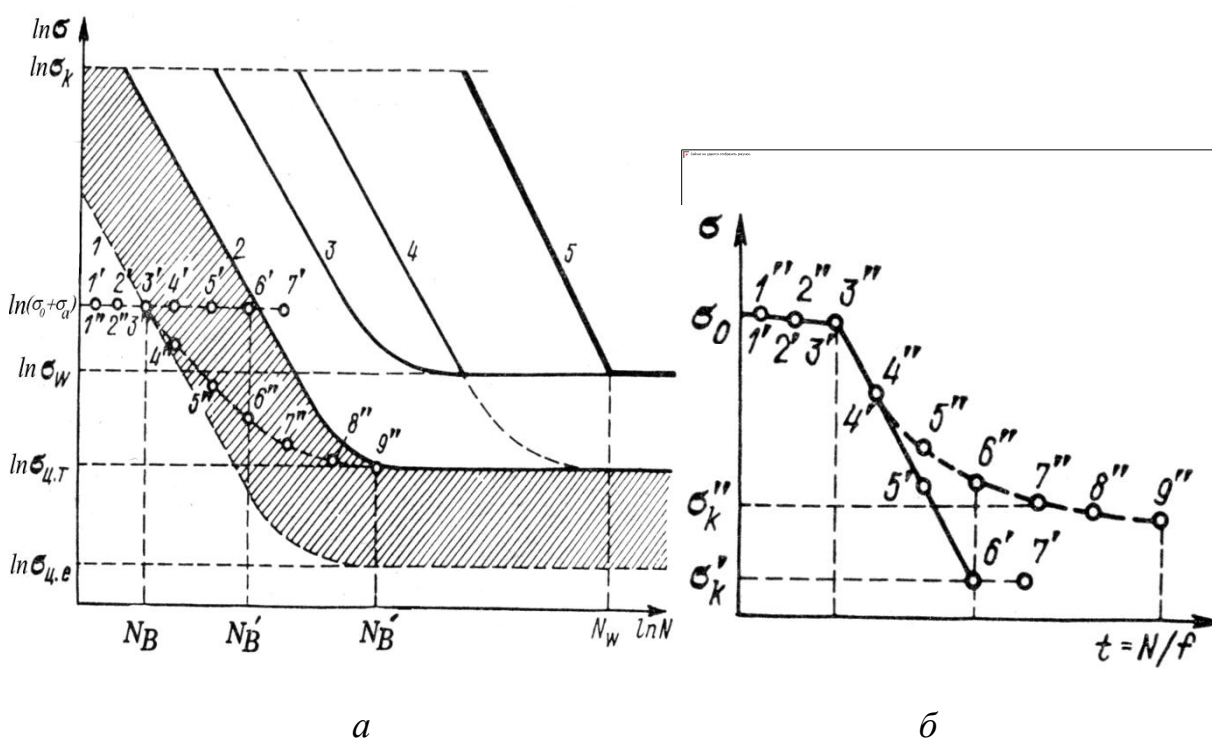


Рис. 1.4. Схема обобщенной диаграммы усталости (а) и кинетика уменьшения остаточных напряжений (б).

σ_k – критическое напряжение усталости;

$\sigma_{ц.т}$ – циклический предел текучести;

σ_w – предел усталости;

$\sigma_{ц.е}$ – циклический предел упругости.

При виброобработке на стадии циклической микротекучести (до линии 2) обычные механические свойства (предел текучести, микротвердость и др.) не изменяются и к ее окончанию при циклическом напряжении, равном пределу усталости, все сечение материала претерпевает небольшую деформацию. Экспериментально установлено, что при длительности виброобработки не более 10^4 циклов фиксируется относительная деформация порядка 10^{-6} – 10^{-4} .

В поверхностном слое и на границах зерен образуется повышенная плотность дислокаций с последующим лавинообразным процессом протекания микропластической деформации сначала в отдельных зернах (с наибольшими градиентами напряжений), а затем по всему сечению нагружаемого металла. Начало интенсивного микропластического течения устанавливается по изменению характеристики внутреннего трения и обозначено на рис. 1.2 линией 1; области макро- и микротекучести разграничены линией 2; линии 3, 4 и 5 отражают, соответственно, стадии циклического упрочнения, образования субмикроскопических трещин и усталостного разрушения.

Начало стадии циклической макротекучести связано с макроскопическим разупрочнением, т. е. с резким увеличением интенсивности «раскрытия» петли гистерезиса, хотя уже в процессе макроскопического разупрочнения некоторые объемы упрочняются.

Эти процессы, происходящие на данной стадии под влиянием циклического деформирования, вызваны прохождением деформации Чернова – Людерса, что свидетельствует о неравномерном развитии пластической деформации и, следовательно, о неравномерном распределении дефектов кристаллической решетки. Полосы Чернова – Людерса могут служить средством анализа поля напряжений при пластической деформации.

В малоуглеродистой стали стадия циклического течения связана с протеканием по всему объему материала макроскопической пластической деформации. Эта стадия характеризуется резким увеличением плотности дислокаций по границам зерен в перлите и вокруг включений, протеканием поперечного скольжения и началом формирования ячеистой дислокационной структуры.

Кроме того, изменяются некоторые физико-механические свойства: повышаются микротвердость и предел пропорциональности, происходит изменение характеристик внутреннего трения, магнитных свойств и прочих характеристик материала. Следует отметить, что в зависимости от структурного состояния материала, вида нагружения, температуры процесса и величины силы динамического возбуждения в условиях циклического нагружения с началом микроскопической пластической деформации могут наблюдаться различные изменения физико-механических свойств.

Выявленные выше особенности поведения материала на различных стадиях (микро- и макротекучести) циклического деформирования позволяют более точно определить область протекания процесса уменьшения остаточных напряжений, соответствующую стадии циклической микротекучести. Процесс уменьшения остаточных напряжений в поле суммарных остаточных и вибрационных напряжений начинается с линии 1 (начало микроскопического течения) и заканчивается линией 2 (начало макроскопического течения). Суммарные значения остаточных и вибрационных напряжений $\sigma_0 + \sigma_a$ должны быть меньше критического напряжения усталости σ_k , при котором на полированной поверхности образца с первого цикла нагружения появляются следы макроскопической деформации и возникают полосы Чернова – Людерса.

Наличие построенных для определенного материала линий 1, 2 и 3 на диаграмме усталости позволяет выбирать режимы виброобработки.

Рассмотрено [25] протекание процесса вибрационного уменьшения остаточных напряжений (см. рис. 1.4) при суммарном значении остаточных напряжений, меньшем статического предела микротекучести.

Виброобработка проводится при приложении вибрационных напряжений с постоянной амплитудой $\sigma_a \approx const$. На обобщенной диаграмме усталости (рис. 1.2, а) отложено суммарное значение остаточных и вибрационных напряжений $\sigma_0 + \sigma_a$. До начала микроскопического течения (линия 1) уменьшение остаточных напряжений незначительно. Через N_B циклов, число которых зависит от суммарного значения остаточных и вибрационных напряжений, отмечено начало процесса пластического деформирования, в процессе протекания

которого остаточные напряжения уменьшились, что соответствует точкам 4''–8''. Критерий окончания виброобработки – достижение линии начала макроскопического течения (точка 9''). Точка 9'' соответствует N_B'' циклам. Время виброобработки может быть определено делением числа циклов N_B'' на частоту f вибрационного воздействия ($t_{обп} = N_B'' / f$).

После определения величины $\sigma_0 + \sigma_a$, соответствующей точке 9'' (например, $\sigma_a + \sigma_C \sigma_T^y$), найдено значение σ_k'' , до которого удается снизить виброобработкой остаточные напряжения.

Таким образом, благодаря неравномерному распределению остаточных напряжений в сварных конструкциях степень уменьшения остаточных напряжений в различных точках изделия будет различной ввиду непостоянства суммарного значения остаточных и вибрационных напряжений $\sigma_0 + \sigma_a$.

Возможен случай, когда в процессе виброобработки для уменьшения остаточных напряжений увеличивают σ_a , чтобы сумма остаточных и вибрационных напряжений оставалась постоянной: $\sigma_0 + \sigma_a = const$, вследствие чего скорость уменьшения остаточных напряжений поддерживается также постоянной (точки 3'–6'), и достигается наиболее полное снижение остаточных напряжений. Теоретически уровень остаточных напряжений после виброобработки будет соответствовать примерно 20 % от первоначальных σ_0 . В рассмотренном случае время виброобработки определяется числом циклов N_B' , которое значительно меньше определяемого числом циклов N_B'' времени виброобработки в предыдущем случае. Очевидно, что при правильном выборе вибрационного воздействия в процессе виброобработки можно достичь более равномерного снижения напряжения, повысить качество и эффективность процесса. При этом замечено, что виброобработка не только повышает механические характеристики материала, такие как предел прочности и пропорциональности [135], но и затрагивает такую физическую характеристику, как твердость [136]. При этом металлографические исследования показывают [38; 136–154], что структурные изменения

аналогичны таковым при термообработке. Эти изменения направлены на снижение энергетического потенциала возбужденной кристаллической решетки мартенситной матрицы: выделяется из решетки избыточный углерод, снижаются ее микроискажения, уменьшается плотность дислокаций [156; 157]. В то же время повышаются требования ко времени окончания процесса.

Однако нужно учитывать тот факт, что не все материалы одинаково ведут себя при вибрационной обработке [26; 158–161]. Очевидно, что процесс выбора наиболее оптимальных параметров вибрационной обработки на сегодняшний момент изучен недостаточно и, несомненно, требует более глубокого анализа.

1.6.2. Реологические модели, описывающие механизм вибрационного старения

Ввиду сложности действительного строения металлов и сплавов целесообразно изучать поведение материалов при помощи простейших моделей [162; 163]. При этом вместо системы с неизвестной структурой вводится механическая модель специального вида; причем предполагается, что эта модель ведет себя аналогично реальной системе. Такие модели могут состоять из различных элементов, например упругих пружин, гидравлических амортизаторов и элементов трения, которые не имеют точных аналогов в реальных материалах [162].

В качестве элементов предлагаются следующие элементы (рис. 1.5):

1. Элемент Гука – спиральная пружина жесткости C , где C соответствует эффективному модулю упругости E (рис. 1.5, а) [164].

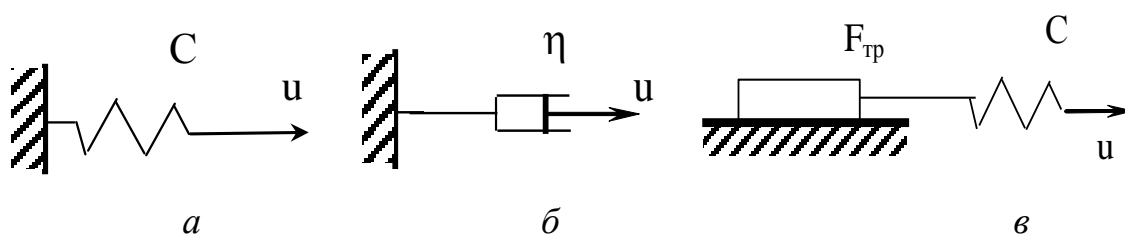


Рис. 1.5. Элементы:

а – Гука; б – Ньютона; в – Сен-Венана

2. Элемент Ньютона (ньютоновская жидкость) – амортизатор, наполненный очень вязким маслом, в котором свободно перемещается поршень. Если двигать поршень со скоростью \dot{y} , то сопротивление его движению будет пропорционально скорости с коэффициентом пропорциональности η (рис. 1.5, а) [165].

Обычно этот элемент применяют в комбинации с расположенным параллельно ему элементом Гука – такая модель получила название модели Фойгта.

3. Модель Сен-Венана – шероховатый груз, находящийся на горизонтальной поверхности, при этом между грузом и поверхностью действует сухое трение; чтобы смоделировать поведение пластического тела, этот груз необходимо тянуть за прикрепленную к нему пружину Гука (рис. 1.5, а) [162].

Для того чтобы построить модели сложных тел, обладающих сложными реологическими свойствами, можно соединять эти элементы последовательно или параллельно. Если элементы соединены параллельно, то нагрузки, воспринимаемые каждым элементом, складываются, тогда как скорость удлинения каждого элемента одинакова. Если элементы соединены последовательно, то складываются скорости удлинения всех элементов и каждый из них подвергается одной и той же нагрузке.

Первые попытки создания математических моделей для расчета процесса вибрационного старения или оценки уровня остаточных напряжений после нее относятся ко второй половине 70-х годов XX столетия. Эти работы проводились в МВТУ им. Н. Э. Баумана под руководством профессора В. М. Сагалева. Однако исследования носили в основном характер обработки экспериментальных данных и были сведены, по сути, к модели, позволяющей произвести выбор частоты вибрационной обработки.

Из предложенных различными авторами математических моделей среды, подвергаемой вибрационной обработке, представляют интерес для дальнейшего рассмотрения следующие модели:

Реологическая модель, предложенная Е. В. Кузнецовым

В описываемой модели поведение реального материала предполагается изучать при помощи модели, изображенной на рис. 164.

В работе [166] найдены соотношения между напряжениями и деформациями для случая приложенной статической нагрузки.

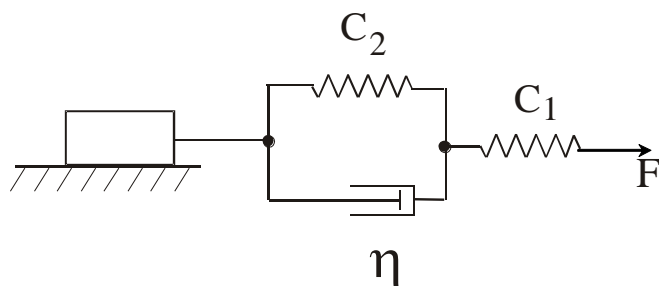


Рис. 1.6. Модель Кузнецова.

Для случая нагрузки, изменяющейся во времени, предлагается уравнение вида (1.1):

$$\ddot{\sigma} + \omega_0^2 \sigma = f(\sigma; \dot{\sigma}) - \frac{\omega_0 \dot{\sigma}}{2\pi}, \quad (1.1)$$

где σ – «действующие напряжения пластического течения»; к сожалению, что именно подразумевает под этим термином автор, неизвестно, как неизвестен и вид функции $f(\sigma; \dot{\sigma})$, который не используется автором при получении решения. Анализ влияния различных параметров на поведение модели не проводились

Остаточные напряжения моделируются при помощи предварительного сжатия пружин с жесткостью C_1 и C_2 , т. е. действующая сила F состоит из двух составляющих: статической и динамической. Таким образом, уменьшение уровня остаточных напряжений фактически представляет собой уменьшение статической составляющей внешней силы при неизменной динамической составляющей. Такой подход верен с физической точки зрения, однако приводит к повышению сложности уравнений, описывающих поведение механической системы.

Реологические модели, предложенные А. В. Колотом

В работе [55] рассмотрены две модели, описывающие вибрационное старение. В качестве основной предлагается модель вида, изображенного на рис 1.7.

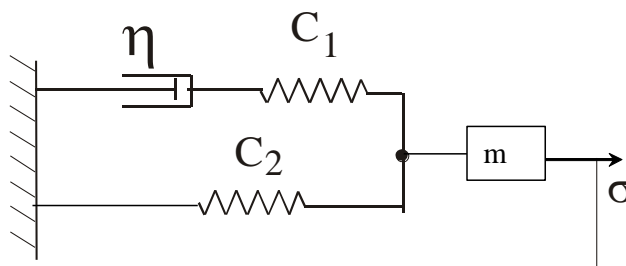


Рис. 1.7. Модель Колота (1-й вариант).

Однако, как видно из рассмотрения модели, она не содержит элемента, моделирующего остаточные напряжения и их релаксацию. В силу этого модель не описывает процесс вибрационного старения, а дает связь между напряжениями и деформациями при колебаниях.

Большой интерес представляет модель, предложенная этим же автором и изображенная на рис. 1.8.

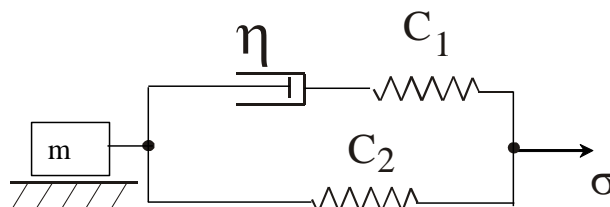


Рис. 1.8. Модель Колота (2-й вариант).

Как видно, данная модель является вариацией модели Е. В. Кузнецова, но введенный в модель среды массовый элемент является спорным моментом, так как он не имеет аналогии в феноменологической макрореологии [162]. Тем более что при рассмотрении модели этот элемент считается равным массе самой конструкции, подвергаемой вибрационной обработке. Приведенные в работе уравнения не учитывают вязкий элемент и скольжение элемента Сен-Венана и описывают свободные колебания массы на пружине. Поэтому эта модель является некорректной.

РАЗДЕЛ 2

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРАЦИОННОЙ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

2.1. Обоснование выбора математической модели

Для описания поведения вязкоупругих свойств материалов применяют механические модели, представляющие последовательно соединенные элементы Гука и Фойгта [165]. Механическая модель, названная моделью Кельвина [170] или стандартного линейного тела [150], показана на рис. 2.1. и была детально исследована К. Зинером [171].

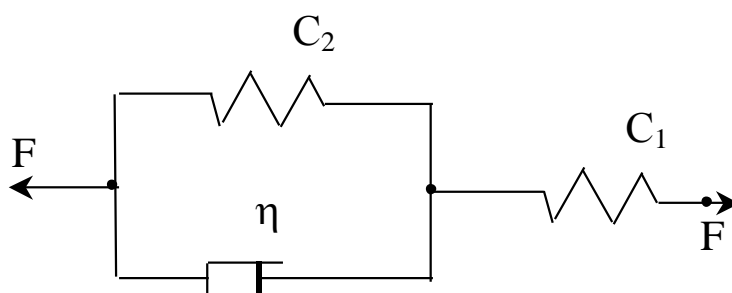


Рис. 2.1. Модель Кельвина.

Модель Кельвина не описывает пластическое течение металлов, имеющее место при вибрационном старении [172–174]. В работе [168] предложена механическая модель, которая описывает поведение металла в процессе вибрационного старения, изображенная на рисунке 2.2, где C_1, C_2, C_3 – коэффициент жесткости упругих элементов, Н/м; η – коэффициент вязкости, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}}$; $F_{тр}$ – сила трения скольжения кулоновского элемента, Н; $\Delta_{нач}$ – начальное смещение кулоновского элемента относительно положения равновесия, м; A – амплитуда

колебаний кинематического возбуждения, м; ω – круговая частота колебаний кинематического возбуждения, 1/с.

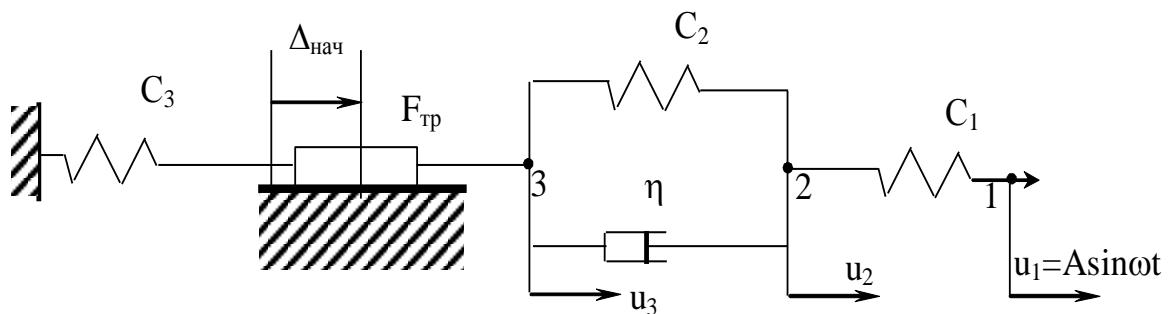


Рис. 2.2. Механическая модель вибрационного снижения остаточных напряжений.

Необратимая часть деформации моделируется элементом Сен-Венана, а величина остаточных напряжений $\tilde{\sigma}$ определяется жесткостью упругого элемента C_3 и величиной $\Delta_{нач}$. При нагружении системы гармонической нагрузкой (под воздействием которой в материале возникают напряжения с амплитудой σ_a) упруговязкие процессы моделируются элементом Кельвина. В момент, когда усилия в пружине C_3 и амплитудная нагрузка складываются, происходит скольжение элемента Сен-Венана, соответствующее пластическому течению реального металла. Одновременно освобождается часть энергии, накопленная моделью за счет упругого сжатия пружин C_1 и C_2 . Остаточные напряжения уменьшаются. Система возвращается в состояние, подобное исходному, с меньшим значением предварительного смещения элемента Сен-Венана. При этом чем выше было значение предварительной деформации упругого элемента с жесткостью C_3 , тем на большую величину произойдет скольжение элемента Сен-Венана и изменение деформации вышеупомянутого элемента.

В случае когда суммарная нагрузка не превышает силу трения в элементе Сен-Венана, скольжение не происходит. Очевидно, что предложенная модель отражает периодический характер пластической деформации, представляющей собой цепь последовательных актов релаксации напряженного состояния.

Таким образом, в механической модели, представленной на рис. 2.2, использованы следующие механические аналогии:

Δ – остаточная деформация;

u_2 – текущая упругая деформация;

u_3 – текущая пластическая деформация;

$F_{нач} = \Delta_{нач} c_3$ – значение остаточных напряжений в начальный момент времени;

$F_{вн} = \Delta c_3$ – текущее значение остаточных напряжений;

F_{mp} – предел текучести;

ω – частота вынужденных колебаний.

Уравнения, описывающие поведение модели, получены из рассмотрения условий равновесия в 1-й, 2-й и 3-й точках (2.1):

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \omega t; \\ c_1(u_1 - u_2) = c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3); \\ c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3) = \text{sign}(u_3)F_{mp} + c_3(\Delta + u_3). \end{cases} \quad (2.1)$$

Для анализа движения механической модели можно выделить четыре последовательно сменяющихся режима движения: сцепление – движение в положительном направлении – сцепление – движение в отрицательном направлении. При этом в зависимости от величин амплитуды кинематического возбуждения и восстанавливающей силы $F_{\text{вн}}$ второй и четвертый режимы могут отсутствовать. Условия смены режимов будут рассмотрены ниже.

Рассмотрены три основных режима движения:

- скольжения нет – кулонов элемент считаем жестким заземлением (режим сцепления);

- скольжение в отрицательном направлении ($\Delta > 0$) – сумма значений восстанавливающей силы $F_{\text{вн}}$ и максимального значения силы, возникающей от действия кинематического возбуждения больше силы трения (режим релаксации);

- скольжение в положительном направлении – максимальное значение силы, возникающей от действия кинематического возбуждения больше суммы значений восстанавливающей силы $F_{\text{вн}}$ и силы трения (режим возрастания остаточных напряжений).

Система (2.1) сводится к одному линейному дифференциальному уравнению первого порядка, для которого необходимо добавить начальные условия, определяемые из значения переменных состояния в последний момент предыдущего режима (условие непрерывности решения). Решение – непрерывные функции $(u_1(t), u_2(t), u_3(t))$, каждая из которых представляет собой дифференцируемую функцию в любой момент времени, кроме моментов смены режима. В моменты смены режима из условия непрерывности $u_i(\tau^-) = u_i(\tau^+)$. Начало отсчета – положение равновесия в начале цикла.

Режим сцепления. В этом случае кулонов элемент считается жестким закреплением, вследствие этого координата точки 3 не изменяется и может быть исключена из рассмотрения. Полученная схема (рис. 2.3) соответствует схеме вязкоупругого тела [164].

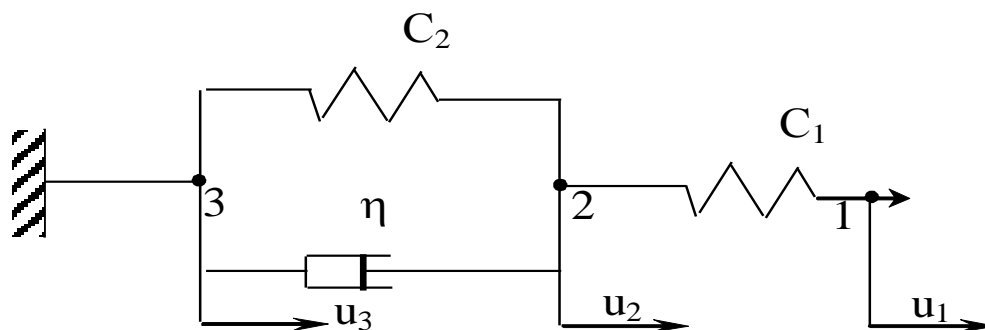


Рис. 2.3. Режим сцепления.

Уравнения (2.1) принимают вид (2.2):

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \omega t ; \\ c_2 u_2 + \eta \dot{u}_2 = c_1 (u_1 - u_2) ; \\ u_3 = \text{const.} \end{cases} \quad (2.2)$$

После подстановки из первого уравнения величины u_1 во второе получено разрешающее уравнение (2.3):

$$\eta \dot{u}_2 + (c_1 + c_2)u_2 = Ac_1 \sin \omega t. \quad (2.3)$$

Решение линейного неоднородного уравнения найдено как сумма частного неоднородного и общего однородного.

Общее решение однородного уравнения найдено разделением переменных (2.4):

$$u_2^o = Ce^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t}, \quad (2.4)$$

где C – константа интегрирования, определяемая из начальных условий. В качестве последних выступает равенство значения координаты u_2 своему текущему значения в момент смены режима.

Частное решение неоднородного уравнения найдено в виде суммы (2.5):

$$\bar{u}_2 = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t, \quad (2.5)$$

где α, β – константы, подлежащие определению.

После подстановки выражения (2.5) в (2.3) и приведения подобных слагаемых коэффициенты α и β были найдены в виде (2.6), (2.7):

$$\alpha = \frac{Ac_1(c_1 + c_2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2}, \quad (2.6)$$

$$\beta = -\frac{Ac_1\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2}. \quad (2.7)$$

Таким образом, частное решение неоднородного уравнения имеет вид (2.8):

$$\bar{u}_2(t) = \frac{Ac_1(c_1 + c_2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) - \frac{Ac_1\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cos(\omega t). \quad (2.8)$$

В соответствии с [175] общее решение уравнения получено в виде (2.9):

$$u_2(t) = \frac{Ac_1(c_1 + c_2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) - \frac{Ac_1\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cos(\omega t) + Ce^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t}. \quad (2.9)$$

Из анализа полученных выражений можно отметить, что амплитуда колебаний точки 2 меньше, чем амплитуда возмущения (амплитуда колебаний точки 1) и отстает от возмущения на фазу φ_0 , которая может быть найдена согласно [175] из условия $\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\eta\omega}{c_1 + c_2}$.

Режим возрастания остаточных напряжений. Система уравнений для системы, изображенной на рис. 2.4, принимает вид (2.10) (рассматривается случай, когда скольжение происходит в положительном направлении)

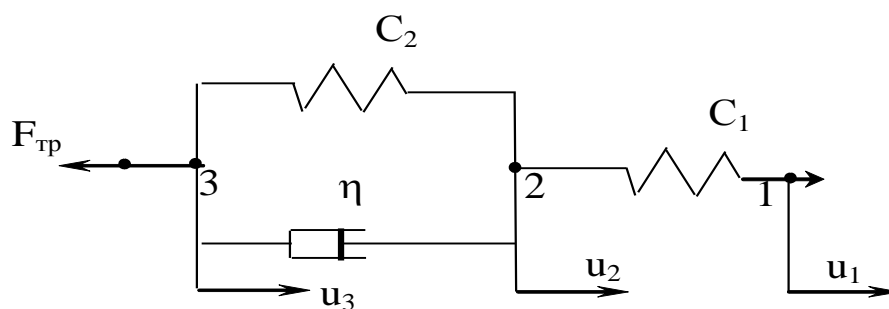


Рис. 2.4. Режим возрастания остаточных напряжений.

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \omega t; \\ c_1(u_1 - u_2) = c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3); \\ c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3) = F_{mp} + c_3(\Delta + u_3). \end{cases} \quad (2.10)$$

После подстановки во второе уравнение величины u_1 из первого и сложения второго и третьего уравнений получено равенство

$$c_1 A \sin \omega t - c_1 u_2 = F_{mp} + c_3 (\Delta + u_3),$$

откуда

$$u_2 = A \sin \omega t - \frac{F_{mp}}{c_1} - \frac{c_3}{c_1} (\Delta + u_3).$$

Полученное соотношение было подставлено во второе уравнение:

$$c_1 \left(\frac{F_{mp}}{c_1} + A \sin \omega t + \frac{c_3}{c_1} (\Delta + u_3) - A \sin \omega t \right) = \\ c_2 \left(A \sin \omega t - u_3 - \frac{F_{mp}}{c_1} - \frac{c_3}{c_1} (\Delta + u_3) \right) + \eta \left(\dot{u}_3 + \left(A \omega \cos \omega t - \frac{c_3}{c_1} \dot{u}_3 \right) \right),$$

после приведения подобных слагаемых

$$\eta (c_1 + c_3) \dot{u}_3 + (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3) \dot{e}_3 = \\ = -(F_{\delta\delta} + c_3 \Delta)(c_1 + c_2) + \eta A \omega c_1 \cos \omega t - A c_2 c_1 \sin \omega t. \quad (2.11)$$

Общее решение однородного уравнения найдено разделением переменных:

$$u_3^o = C e^{\left(-\frac{(c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)}{\eta (c_1 + c_3)} \right) t}, \quad (2.12)$$

где C – константа, которая находится из начальных условий. В качестве последних выступает равенство значения координаты u_3 своему текущему значению в момент смены режима.

Частное решение неоднородного уравнения найдено в виде суммы:

$$\bar{u}_3 = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t + \gamma, \quad (2.13)$$

где α, β, γ – константы.

После подстановки полученного выражения (2.13) в уравнение (2.11) получено:

$$\eta(c_1 + c_3)(\alpha \omega \cos \omega t - \beta \omega \sin \omega t) + (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)(\alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t + \gamma) = - (F_{\delta\delta} + c_3 \Delta)(c_1 + c_2) + \eta A \omega c_1 \cos \omega t - A c_2 c_1 \sin \omega t.$$

Откуда

$$\gamma = - \frac{(F_{mp} + c_3 \Delta)(c_1 + c_2)}{(c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)}. \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{A(\eta\omega)^2(c_1 + c_3) c_1 - A c_2 c_1 (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)}{(\eta\omega)^2(c_1 + c_3)^2 + (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)^2}, \quad (2.15)$$

$$\beta = \frac{\eta \omega}{(c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)} \left\{ A c_1 \frac{A(\eta\omega)^2(c_1 + c_3)^2 c_1 - A c_2 c_1 (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)(c_1 + c_3)}{(\eta\omega)^2(c_1 + c_3)^2 + (c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)^2} \right\} \quad (2.16)$$

После подстановки получено общее решение неоднородного уравнения в виде выражения (2.13), где коэффициенты α, β, γ определены из выражений (2.14)–(2.16):

$$u_3 = \left(\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \right) \sin(\omega t + \varphi) + \gamma + C e^{\left(- \frac{(c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)}{\eta(c_1 + c_3)} \right) t}, \quad (2.17)$$

где $\varphi = \arctg \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)$.

Режим релаксации остаточных напряжений. При этом режиме направление восстанавливающей силы не совпадает с направлением силы трения $F_{\delta\delta}$. Уравнения для данной системы получены аналогично.

Скольжение происходит так же, как и в предыдущем случае, в положительном направлении; предварительное смещение отрицательное.

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \omega t ; \\ c_1(u_1 - u_2) = c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3); \\ c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3) = F_{mp} - c_3(\Delta - u_3). \end{cases} \quad (2.18)$$

$$c_1 A \sin \omega t - c_1 u_2 = (F_{mp} - c_3 \Delta) + c_3 u_3, \quad (2.19)$$

Общее решение однородного уравнения (2.19), а также коэффициенты α , β в решении неоднородного уравнения имеют вид, определенный зависимостями (2.12), (2.15) и (2.16) соответственно. Коэффициент γ описывается выражением (2.20):

$$\gamma = -\frac{(F_{mp} - c_3 \Delta)(c_1 + c_2)}{(c_1 c_3 + c_1 c_2 + c_2 c_3)}. \quad (2.20)$$

Общее решение неоднородного уравнения определено в виде (2.17).

2.2. Условия возникновения скольжения и длительной релаксации

Условия возникновения скольжения. Условие движения в положительном направлении рассмотрено для случая, когда предварительное смещение также положительно (условие возрастания остаточных напряжений). Условие для случая отрицательного смещения (режим релаксации) было получено по аналогии. Условие возникновения скольжения заключается в том, что сумма проекций силы упругости от действия кинематического возбуждения и силы упругости от предварительного смещения должна быть равна силе трения (2.21):

$$c_2(u_2 - u_3) + \eta(\dot{u}_2 - \dot{u}_3) + c_3\Delta = F_{mp}. \quad (2.21)$$

Для нахождения условий возникновения скольжения в выражение (2.21) подставлено решение $u_2(t)$ из (2.9), при этом $\dot{u}_3 = 0$:

$$\begin{aligned} & c_2 \left(\frac{Ac_1(c_1 + c_2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) - \frac{Ac_1\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cos(\omega t) + Ce^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t} \right) + \\ & + \eta \left(\frac{Ac_1(c_1 + c_2)\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{Ac_1\eta\omega^2}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \sin(\omega t) - \frac{(c_1 + c_2)}{\eta} Ce^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t} \right) + \\ & + c_3\Delta = F_{mp}. \end{aligned}$$

После приведения подобных слагаемых выражение приобретает вид:

$$\begin{aligned} & \frac{Ac_1(c_2(c_1 + c_2) + (\eta\omega)^2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{Ac_1^2\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cdot \cos(\omega t) - \\ & - Cc_1e^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t} + c_3\Delta = F_{mp}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

При этом если выполняется условие (2.23):

$$\begin{aligned} & \frac{Ac_1(c_2(c_1 + c_2) + (\eta\omega)^2)}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \sin(\omega t) + \frac{Ac_1^2\eta\omega}{(c_1 + c_2)^2 + (\eta\omega)^2} \cos(\omega t) - \\ & - Cc_1e^{-\frac{(c_1+c_2)}{\eta}t} + c_3\Delta < F_{mp}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

то это означает, что скольжение в системе отсутствует.

Условие возникновения скольжения в положительном направлении (2.24), если предварительное смещение отрицательное (условие возникновения режима релаксации), было получено аналогично:

$$\frac{Ac_1(c_2(c_1+c_2)+(\eta\omega)^2)}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{Ac_1^2\eta\omega}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \cos(\omega t) - Cc_1e^{-\frac{(c_1+c_2)t}{\eta}} - c_3\Delta = F_{mp}. \quad (2.24)$$

Условия длительной релаксации. Очевидно, что наиболее рациональными будут такие условия, при которых будет наблюдаться только режим релаксации остаточных напряжений, а условие возникновения режима возрастания остаточных напряжений выполняться не будет. Такие условия могут быть записаны в виде (2.25):

$$\frac{Ac_1(c_2(c_1+c_2)+(\eta\omega)^2)}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{Ac_1^2\eta\omega}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \cos(\omega t) - Cc_1e^{-\frac{(c_1+c_2)t}{\eta}} - c_3\Delta < F_{mp} < \frac{Ac_1(c_2(c_1+c_2)+(\eta\omega)^2)}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{Ac_1^2\eta\omega}{(c_1+c_2)^2+(\eta\omega)^2} \cdot \cos(\omega t) - Cc_1e^{-\frac{(c_1+c_2)t}{\eta}} + c_3\Delta. \quad (2.25)$$

Для реальных тел существенные изменения напряжений происходят для количества циклов порядка 10^4 . Для получения качественного соответствия поведения полученной механической модели и материала, в котором происходит процесс вибрационного старения, следует произвести подбор соотношений между жесткостями c_1 , c_2 , c_3 .

Путем параметрического анализа были найдены условия (2.26), при которых поведение механической модели соответствует поведению материала, в котором происходит процесс вибрационного старения:

$$c_2 = (6 \div 10)c_1; \quad c_2 + c_1 = (9 \div 10)c_3. \quad (2.26)$$

2.3. Влияние параметров механической модели на скорость релаксации

Для изучения влияния частоты вибрационной обработки на скорость релаксации проведена серия расчетов, при которых варьировалось значение отношения $\frac{\eta\omega}{c_1 + c_2}$, соотношения между коэффициентами упругости были выбраны на основании зависимостей (2.26) равными $c_2 = 7c_1$; $c_2 + c_1 = 9c_3$. Полученные результаты приведены на рис. 2.8.

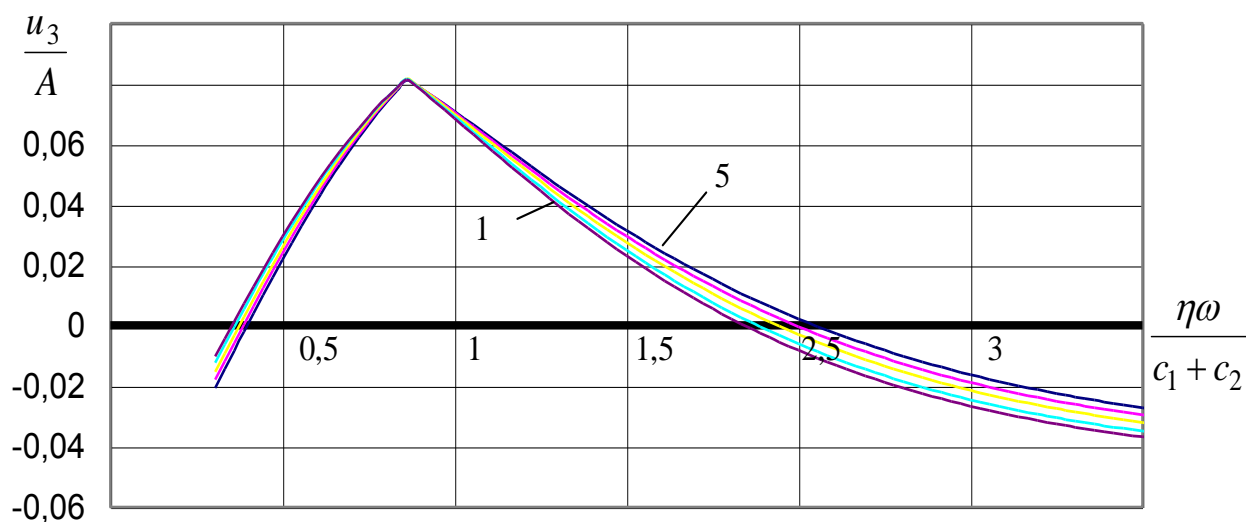


Рис. 2.8. Зависимость величины относительного приращения элемента Сен-Венана от соотношения $\eta\omega/c_1 + c_2$, где 1–5 – отношение $\Delta_{нач}/A$.

На представленном графике вдоль горизонтальной оси отложены значения величины фазового сдвига, вдоль вертикальной – средние приращения отношения величины сдвига элемента Сен-Венана к амплитуде кинематического возбуждения за первые 100 циклов колебаний.

Как видно из полученных результатов, рассматриваемая зависимость – нелинейная. Отмечены значения фазового сдвига, которые обеспечивают отрицательное приращение величины u_3 (сдвига элемента Сен-Венана), что свидетельствует о том, что возможны частоты возбуждения, при которых режим релаксации в системе отсутствует.

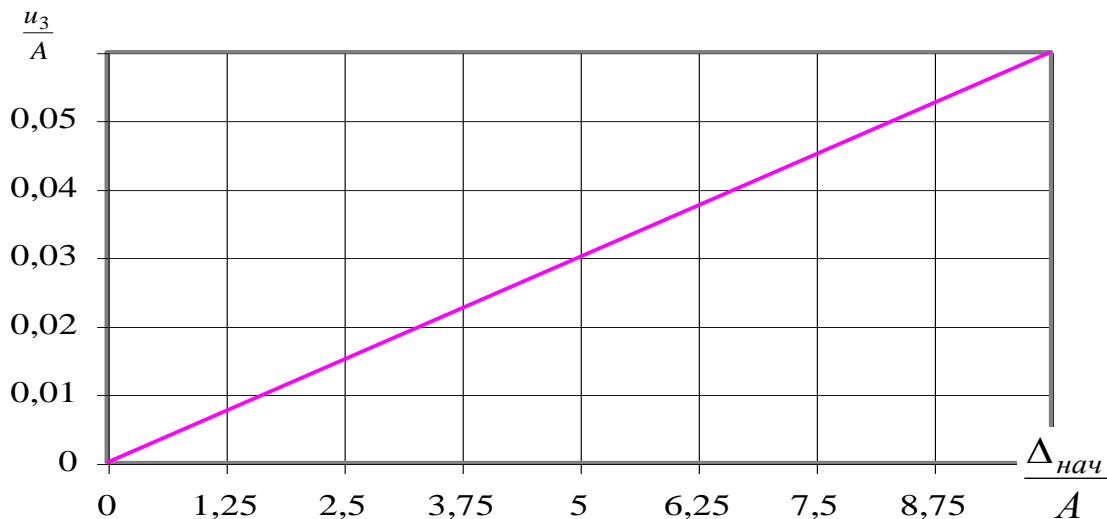


Рис. 2.9. Зависимость величины относительного приращения элемента Сен-Венана от соотношения $\Delta_{нач}/A$.

Аналогичным образом было рассмотрено влияние амплитуды кинематического возбуждения и величины начального смещения $\Delta_{нач}$ на суммарное приращение величины сдвига элемента Сен-Венана за первые 100 циклов колебаний, отнесенное к амплитуде кинематического возбуждения. Как видно из графиков, приведенных на рис. 2.9, полученная зависимость прямо пропорциональна.

2.4. Анализ свойств механической модели

Для анализа поведения предложенной модели был проведен численный расчет процесса релаксации. При расчете были выбраны следующие параметры: $c_1 = 20$ кН/м; $c_2 = 140$ кН/м; $c_3 = 180$ кН/м; $\eta = 50$ кН·с/м; $\Delta_{нач} = 1$ м, $A = 0,5$ м; $\omega = 3$ с⁻¹, $F_{тр} = 300$ кН.

После анализа полученного графика уменьшения величины остаточных напряжений (рис. 2.10) были получены следующие выводы:

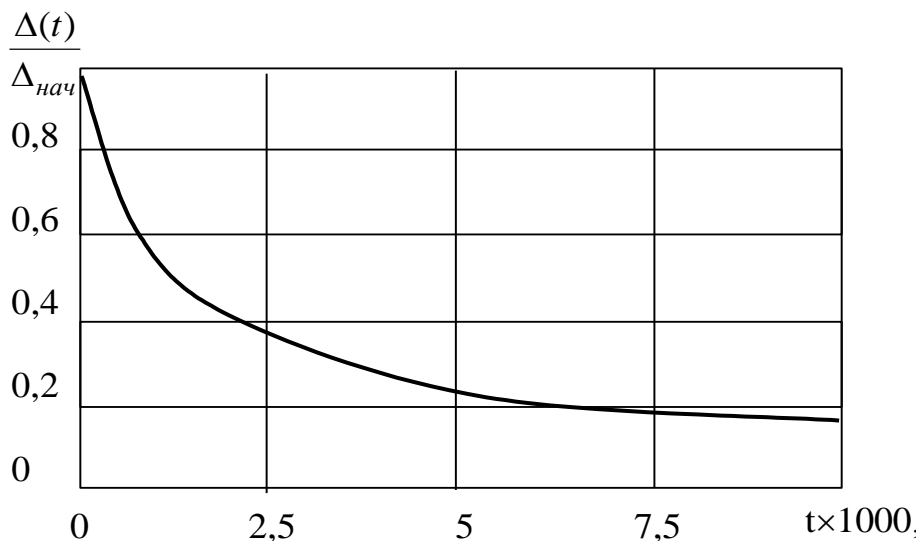


Рис. 2.10. График уменьшения величины остаточных напряжений.

- скорость релаксации пропорциональна величине остаточных напряжений и амплитуде динамических напряжений в текущий момент времени;

- релаксация напряжений происходит не до нуля, а до некоторого уровня, при котором величина сил внешнего воздействия не превышает критическую силу (рис. 2.11, а, б);

- при определенной величине критической силы сдвиги происходят в обоих направлениях; при этом в направлении, совпадающем с направлением восстанавливающей силы, они больше, поэтому релаксация в этом случае также происходит (рис. 2.11, б).

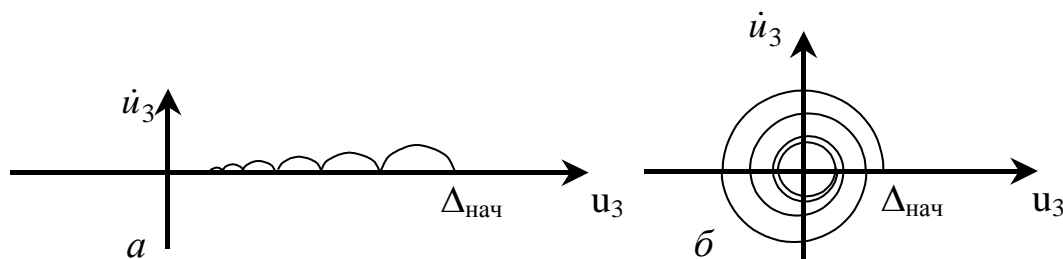


Рис. 2.11. График уменьшения величины остаточных напряжений (фазовая плоскость).

Кроме того, из анализа графика уменьшения величины остаточных напряжений за первые 5 циклов (рис. 2.12) можно отметить, что движение состоит из серии малых сдвигов.

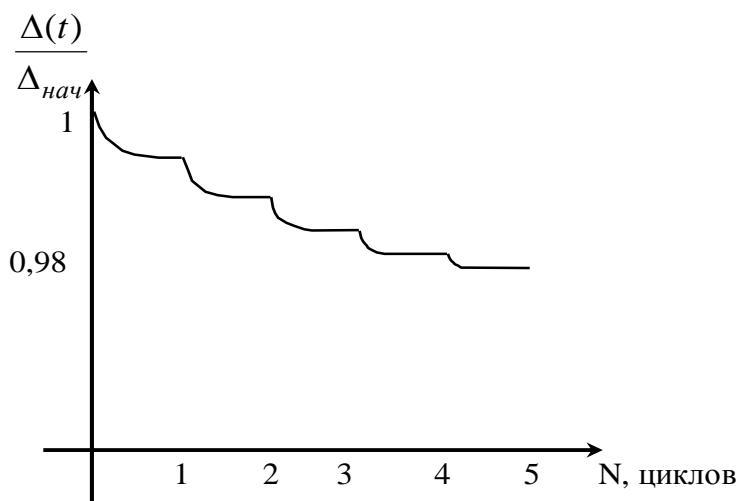


Рис. 2.12. График уменьшения величины остаточных напряжений за первые 5 циклов (скольжение происходит только в положительном направлении).

Величина сдвига за один цикл на основании (2.17) равняется (2.31):

$$\frac{du_3}{dN} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(\omega\tilde{t} + \varphi) + \gamma, \quad (2.31)$$

где коэффициенты α , β , γ определяются из (2.14)–(2.16), (2.18);

\tilde{t} – время скольжения, определяемое из условий (2.24)–(2.25).

Тогда величина изменения остаточной деформации за один цикл представлена виде (2.32):

$$\frac{d\Delta}{dN} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(\omega\tilde{t} + \varphi) + \gamma. \quad (2.32)$$

РАЗДЕЛ 3

ВИБРООБРАБОТКА СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В литературных источниках приведены экспериментально полученные кривые релаксации остаточных напряжений при виброобработке. Недостатком данных исследований является то, что они проведены для случая плоского изгиба, когда в образце возникают и нормальные, и касательные напряжения. В связи с этим, полученные на основании данных кривых параметры математической модели среды, в которой проходит процесс вибрационного старения, будут иметь погрешность. Таким образом, необходимы кривые релаксации остаточных напряжений при виброобработке, полученные для одноосного напряженного состояния. С этой целью проведен процесс вибрационного старения для случая чистого изгиба в балке прямоугольного поперечного сечения.

3.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой систему из двух двуопорных балок: траверсы 1 и испытываемой 2. Балки скреплены между собой стержнями 3 (рис. 3.1). На траверсе на равном расстоянии между опорами установлен вибровозбудитель 4 (двигатель постоянного тока ДН-11 с закрепленным на валу эксцентриком). Измерение скорости вращения вибровозбудителя производится тахометром 5, соединенным с вибровозбудителем 4 гибким валом 6. Поперечное сечение траверсы – двутавр № 10 с вертикально расположенными полками и длиной 2,8 м. Траверса закреплена на двух стойках 7, изготовленных из швеллеров № 24. К верхней части стоек приварены опорные площадки, к которым шарнирно крепится траверса с возможностью горизонтального перемещения на одной из опор.

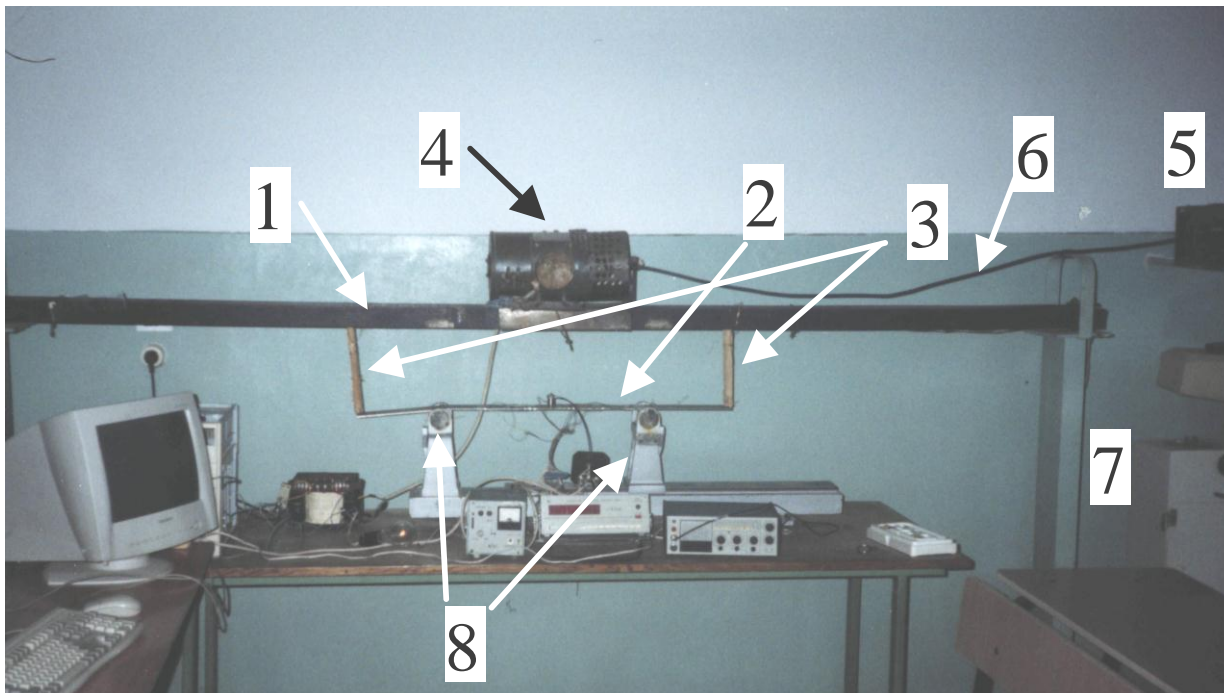


Рис. 3.1. Общий вид экспериментальной установки.

Конструкция экспериментальной установки позволяет изменять место крепления стержней к несущей балке и расстояние от 0,5 м до 1 м между опорами 8. При проведении экспериментов расположение стержней 3 и опор 6 выбрано таким образом, чтобы напряженное состояние в исследуемой балке соответствовало чистому изгибу.

Электрическая схема частотного регулирования скорости вращения изображена на рисунке 3.2.

При помощи специальной программы на один из контактов параллельного (LPT) порта компьютера подаются импульсы прямоугольной формы с напряжением 12 В, которые открывают оптодиоды, включенные в соседние плечи выпрямительного моста. С выпрямительного моста постоянное напряжение через сглаживающий дроссель подается на электродвигатель. Резкие скачки напряжения дополнительно сглаживаются при помощи компенсационного диода и балластного сопротивления. Регулировка скорости вращения производится изменением ширины импульсов и их скважности.

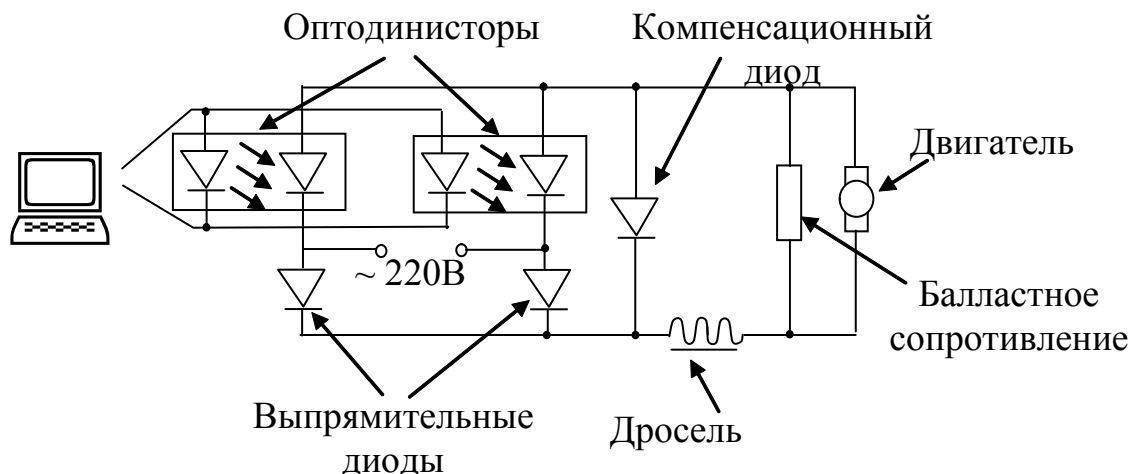


Рис. 3.2. Электрическая схема системы управления.

3.2. Описание и проверка точности измерительных систем

В процессе эксперимента необходимо измерять как статические остаточные напряжения, так и динамические, создаваемые вибровозбудителем. Для этого использовались две независимые измерительные системы: на основе тензостанции ИДЦ-1 для измерения остаточных деформаций и измерительного модуля Е 24 – для динамических. Данный модуль был подключен к последовательному (COM) порту компьютера.

В качестве датчиков для измерения деформаций использовались проволочные тензорезисторы на пленочной основе 2ПКП-30-200 с сопротивлением 199...199,49 Ом, активной базой 30 мм и известным коэффициентом тензочувствительности. Эти датчики были подключены по несбалансированной мостовой схеме, симметричной относительно питающей диагонали (рис. 3.3). В качестве источника питания использовался блок питания «Агат» с выходным постоянным стабилизированным напряжением 12 В.

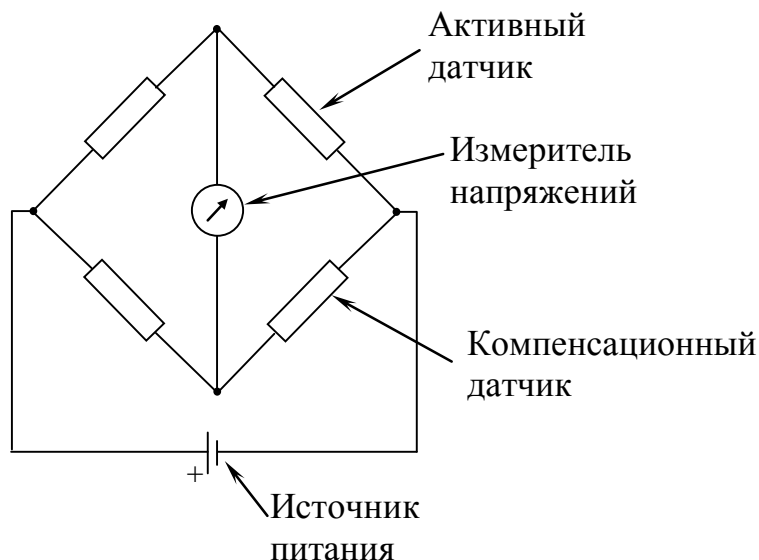


Рис. 3.3. Измерительный мост.

На исследуемую балку при помощи быстросохнущего клея «Цианопан МЕ» было наклеено 4 тензорезистора (два – на верхнюю поверхность, два – на нижнюю) на расстоянии $l/3$ от каждой из опор.

Проверка точности системы на основе тензостанции ИДЦ-1 для оценки механических напряжений [117] была выполнена в условиях чистого изгиба (рис. 3.4). Для этого к исследуемой балке были приложены две равные между собой силы P на одинаковом расстоянии от опор, равном a ; построена эпюра изгибающих моментов; определены расчетные напряжения, возникающие в балке.

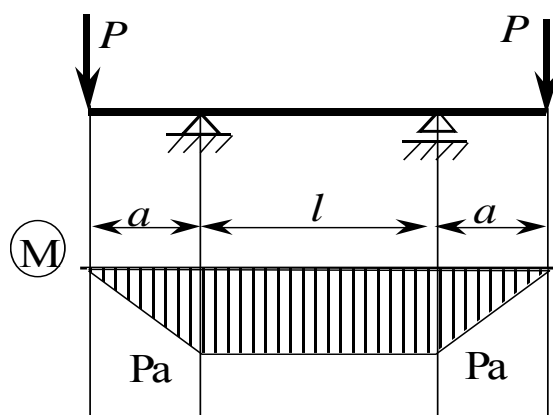


Рис. 3.4. Эпюра изгибающих моментов.

Максимальные напряжения на поверхности балки при чистом изгибе

$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x}$, где $M_{\max} = P \cdot a$; $W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$. В результате

$$\sigma_{\max} = \frac{6P \cdot a}{b \cdot h^2}. \quad (3.1)$$

Исследования проводились на балке длиной 1 м и поперечным сечением 60 мм × 4 мм, расстоянием между опорами 550 мм. Контрольные точки, в которых проводилась оценка, расположены на расстоянии $l/3$ от каждой из опор, две точки на верхней поверхности, две – на нижней.

Расчетные и экспериментальные значения напряжений представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Статические напряжения в балке при чистом изгибе

Номер датчика	1	2	3	4	1	2	3	4
Нагрузка P, Н	50				80			
Расчетные напряжения, МПа	±68,977				±110,362			
Экспериментальные значения напряжений, МПа	72	72	66	72	112	106	110	116
Погрешность, %	4,4	4,4	4,3	4,4	1,5	4	0,3	5,1

Как видно из приведенных данных, погрешность измерительной системы не превышает 6 %, допустимых для инженерных измерений.

Проверка точности системы на основе измерительного модуля E 24

Известно, что при чистом изгибе балка искривляется по дуге окружности с радиусом кривизны ρ , как показано на рис. 3.5.

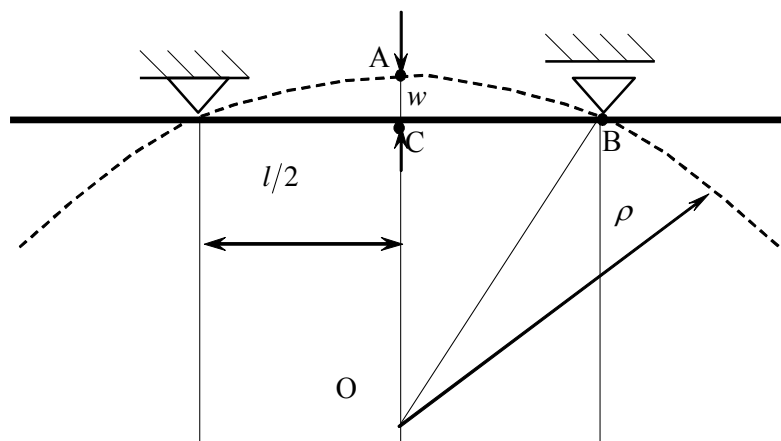


Рис. 3.5. Схема изгиба балки.

Для малых прогибов напряжения на поверхности балки (3.2)

$$\sigma_{\max} = \frac{4E \cdot w \cdot h}{l^2}, \quad (3.2)$$

где w – вертикальное перемещение точки, расположенной на равном расстоянии между опорами;

h – высота балки.

Результаты измерений представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Напряжения в балке при чистом изгибе

№ датчика	Прогиб в центре балки, мм	Теоретические значения, МПа	Экспериментальные значения, МПа	Погрешность
1	4,5	71,405	71,3	0,2 %
2			71,3	0,2 %
3			-60	16 %
4			-71,25	0,2 %
1	7	111,074	114,4	3 %
2			110,6	0,4 %
3			-112,5	1,3 %
4			-120	8 %

Как видно из приведенных в таблицах 3.1 и 3.2 данных, среднеквадратичная погрешность измерительной системы не превышает 6 %, допустимых для инженерных измерений. Следовательно, измерительная система показала достаточную точность и может быть использована для проведения дальнейших исследований.

3.3. Проведение экспериментальных исследований

Остаточные напряжения в исследуемой балке были созданы приложением статической нагрузки путем подвешивания грузов весом 36 кг каждый на краях балки. При этом на половине высоты сечения возникла зона пластической деформации.

Определение собственных частот. Для определения собственных частот исследуемой механической системы был использован метод спектрального анализа [200; 201]. При этом в системе ударом были возбуждены свободные колебания, и при помощи быстрого преобразования Фурье был найден частотный спектр, изображенный на рис. 3.7. Как видно, первая резонансная частота соответствует 450 об/мин двигателя вибровозбудителя.

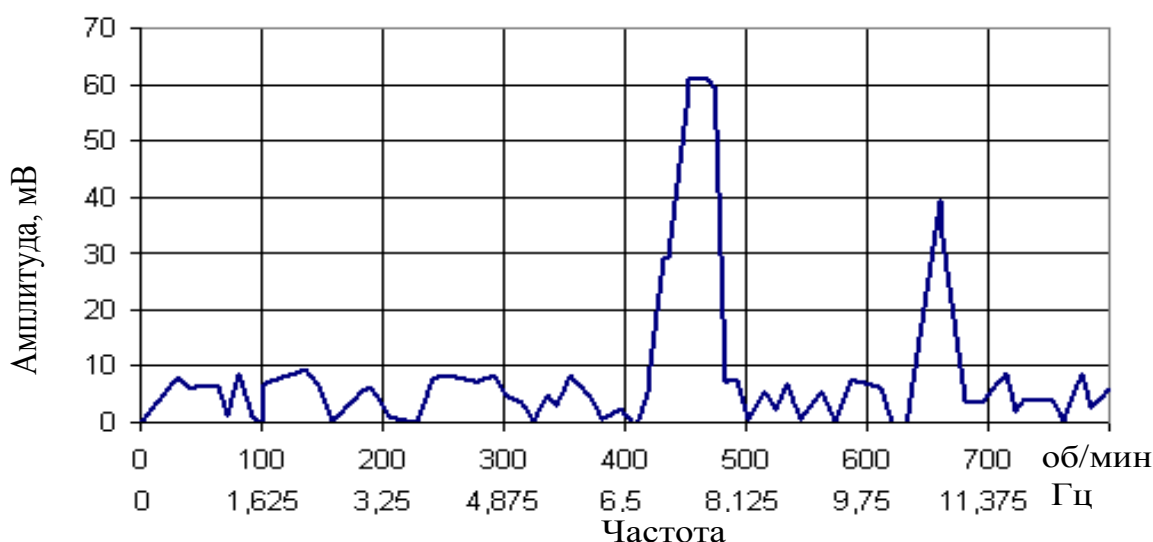


Рис. 3.7. Частотный спектр исследуемой системы.

Проведение процесса вибрационного старения. В исследуемой балке было произведено снижение величины остаточных напряжений методом вибрационной обработки на частоте, равной первой резонансной. Остаточные напряжения оценивались тензостанцией ИДЦ-1 до обработки и после 1, 2, 3, 5, 10 и 15 тысяч циклов колебаний. Контрольные точки, в которых проводилась оценка напряжений, располагались на расстоянии $l/3$ от каждой из опор: две точки на верхней поверхности балки, две – на нижней.

Экспериментальные значения изменения внутренних напряжений представлены в виде графика на рис. 3.8 и таблицы 3.3.

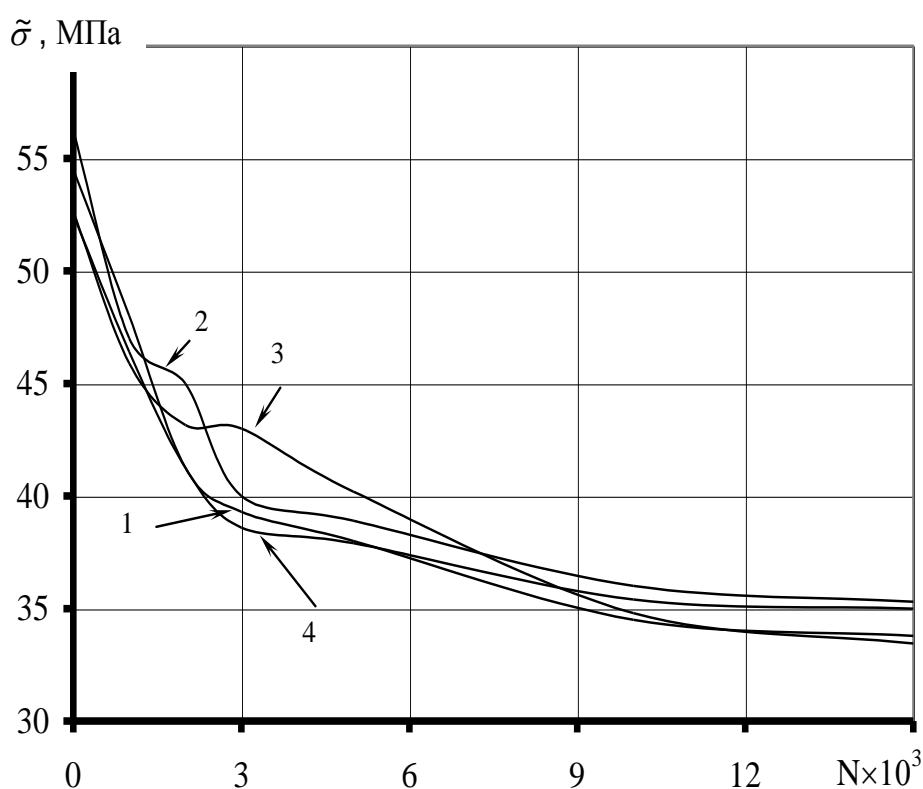


Рис. 3.8. Кривые релаксации.

Ясно, что период изменения остаточных напряжений совпадает со временем релаксации. Поэтому процесс виброобработки был прекращен в момент времени, когда остаточные напряжения были стабилизированы.

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее:

1. Кривые релаксации нелинейны и близки по своей форме к экспоненте. После 5×10^3 циклов скорость уменьшения остаточных

напряжений резко снизилась, после 10×10^3 циклов изменение остаточных напряжений составило порядка 1 % за последующие 5×10^3 циклов.

2. Релаксационные процессы происходили при сумме значений остаточных и динамических напряжений, не превышающей предел текучести (для стали Ст3 $\sigma_T = 240$ МПа).

3. Уменьшение остаточных напряжений происходит до некоторого асимптотического уровня остаточных напряжений.

Таблица 3.3

**Зависимость величины остаточных напряжений
от количества циклов виброобработки**

Номер датчика	Остаточные напряжения до обработки, МПа	Амплитуда динамических напряжений, МПа	Остаточные напряжения после обработки, МПа					
			Количество циклов					
			1×10^3	2×10^3	3×10^3	5×10^3	10×10^3	15×10^3
1	52,5	105,8	46,4	41,25	38,6	37,9	35,4	35
2	56,25		47	45	40	38,9	36	35,3
3	-52,625		-45,9	-43,15	-43	-40,2	-34,8	-33,45
4	-54,5		-48	-41,25	-39,3	-38	-34,5	-33,78

РАЗДЕЛ 4.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ДЕФОРМАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. Влияние вибрационной обработки на размерную стабильность балки коробчатого сечения

Влияние вибро и термической обработки на деформации сварной конструкции изучали при изготовлении балки коробчатого сечения. Согласно технологии балка после сварки подвергается термической обработке-отпуску при 580-600°C. Термическую обработку проводили в газовых горизонтальных печах, размещая детали в горизонтальном положении. Измеряли прогиб изделий после сварки, до и после термической обработки. С этой целью их устанавливали на разметочной плите, наносили керны в точках 1-7 на торцах верхнего и нижнего поясов и производили измерение рейсмусом расстояний от плиты до контролируемых точек (рис.4.1)

Результаты измерений, приведенные в табл. 4.1. и рис. 4.2.

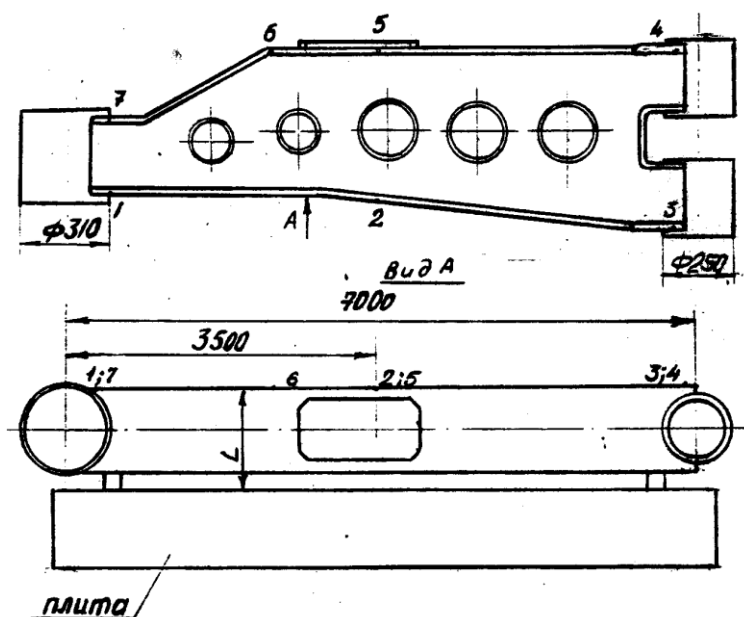


Рис. 4.1. - Общий вид балки на разметочной плите и схема измерений прогиба

Таблица 4.1.

Измерение величины прогиба в сварных балках после различной обработки

№ балки	Измерения после	Расстояние в местах измерений т.т. 1-7, мм						
		1	2	3	4	5	6	7
I	сварка	310	304,5	310	310	306,5	306,5	312,0
	т/о	310	302,5	310	310	304,0	305,0	312,0
2	сварка	310,5	305	311	310,5	307	307 "	312,0
	в/о	310,0	305,5	311	310,5	306,5	307	312,0
3	сварка	310,5	311	310	310	307,5	310	310
	т/о	310,5	312	310	310	309,0	311,5	310
4	сварка	310	304	310,5	310	306	306	311
	в/о	310,5	304,5	310	310	306	306	311,5
5	сварка	310,5	307,5	310	310.	306,0	306	310
	т/о	311,0	307,5	310	310,5	304,5	304,5	310
6	сварка	311	304	310,5	310	306	307	311,5
	в/о	311	304,5	310	310	306	306,5	311,5

Аналогичные измерения произвели на балках, прошедших после сварки не термическую, а вибрационную обработку.

Для проведения процесса вибрационного старения применен виброкомплекс ВК-79 с регулируемым вибровозбудителем, который позволяет развивать виброусилия до 30 кН в диапазоне частот до 130 Гц. Балка закреплялась на специальном вибростенде - стальной плите установленной на резиновые виброизолирующие опоры. К плите прикреплены: регулируемый вибровозбудитель и вибродатчик, вмонтированный в специальный прижим. Критерий окончания процесса виброобработки – стабилизация тока, потребляемого двигателем вибровозбудителя. Результаты также представлены в таблице 4.1.

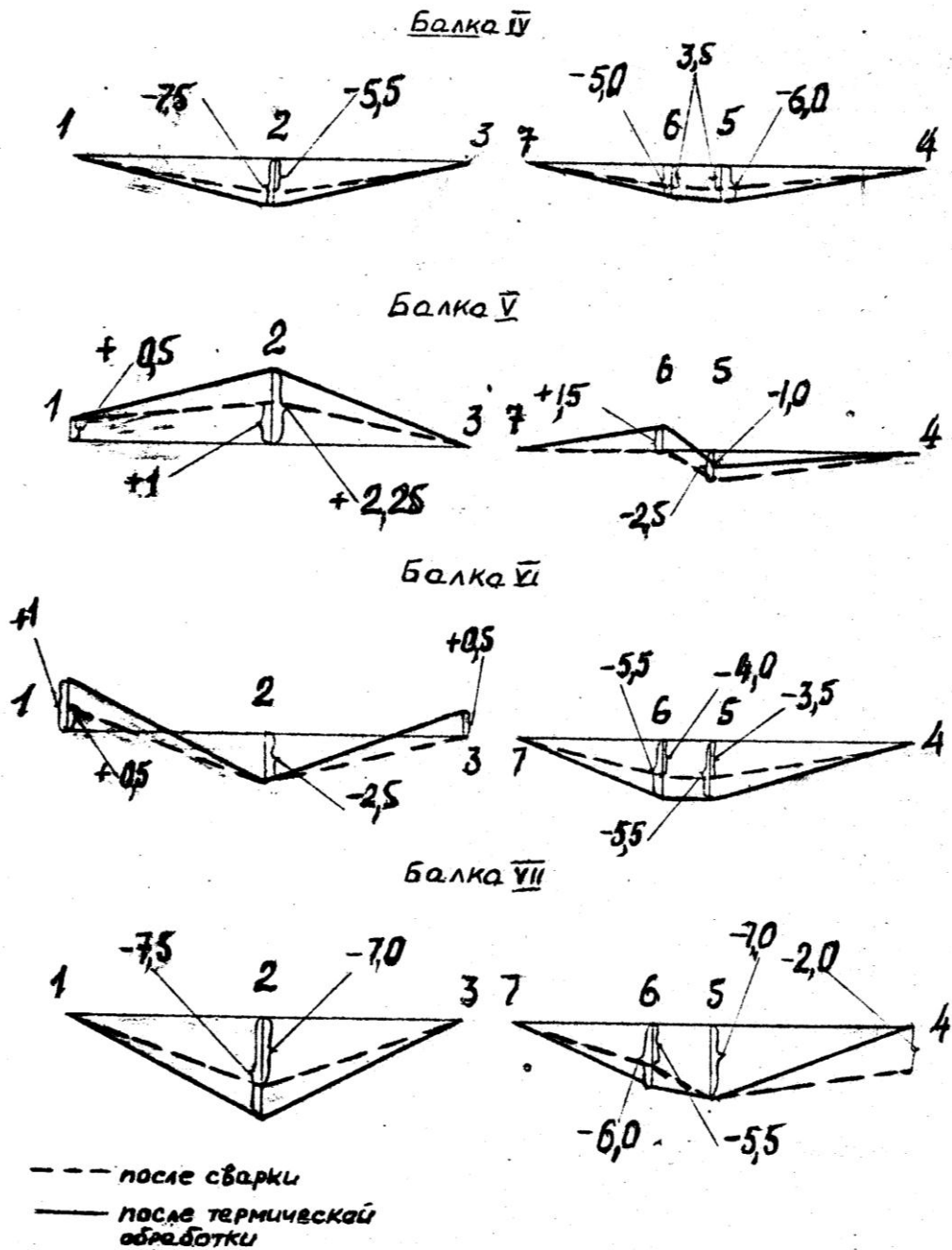


Рис. 4.2. Схема измерения величины прогиба в балках IV-VII после сварки и термической обработки

Измерение прогиба показало, что максимальный прогиб по торцам поясов после сварки составляет 5,5мм, а после термической обработки 7,5мм, т.е. произошло увеличение прогиба на 2,0мм. В тоже время после вибрационной обработки величина прогиба практически не изменилась (таблица 1), а в некоторых точках отмечено его уменьшение, т.е. для уменьшения величин короблений после сварки метод вибрационной

обработки является более предпочтительным по сравнению с термическими методами.

4.2 Сварочные деформации в корпусах редукторов

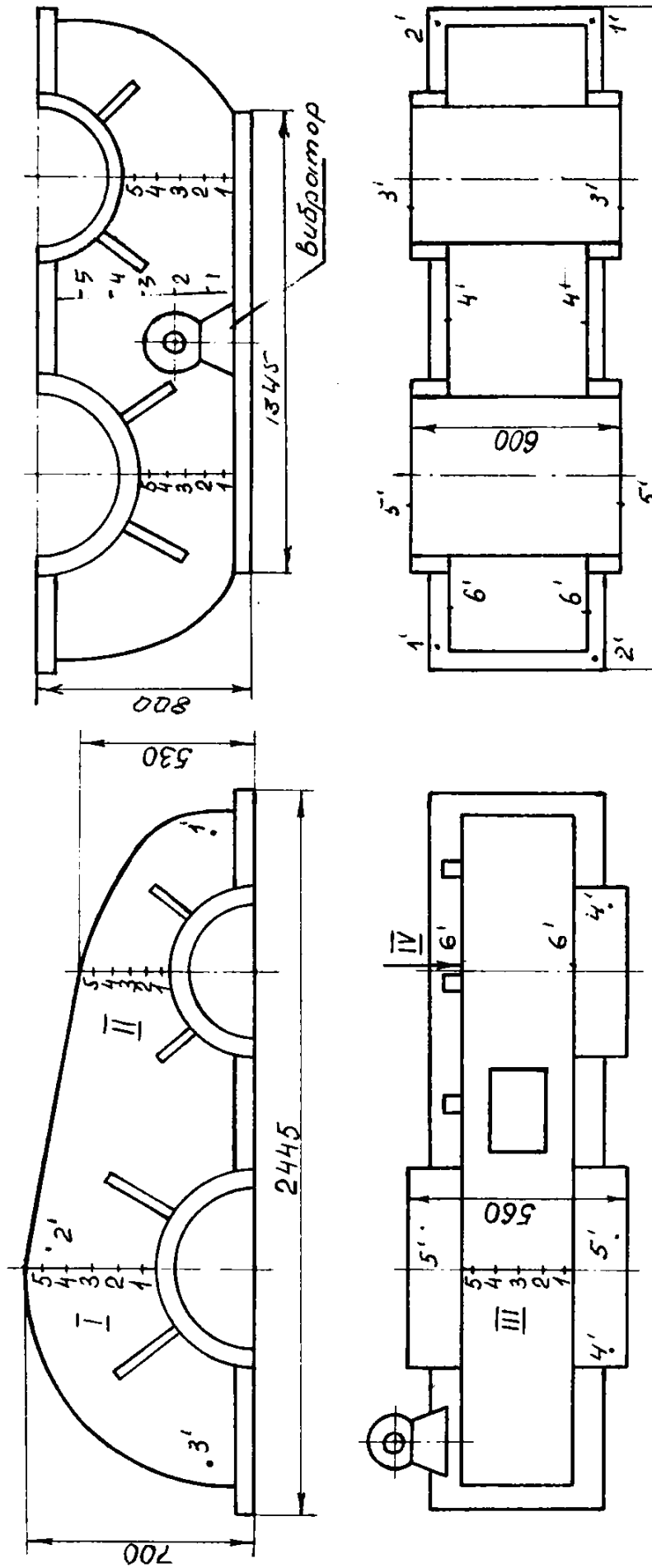
Изучение влияния вибрационной обработки на габаритные размеры было проведено на корпусах редукторов. Для этого на крыжах и корпусах редуктора намечали базовые точки, наносили керны и производили измерения непосредственно после сварки и после виброобработки (рис. 4.3.) Результаты измерений представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений расстояний между точками в сварных узлах редукторов

Наименование детали	Измерение после	Расстояние между точками, мм				
		1'-2'	2'-3'	4'-4'	5'-5'	6'-6'
Крышка	сварки	1643	814	1368	560,5	302
	виброобработки	1643	814	1367,5	560,5	302
		1-1	2-2	3-3	4-4	5-5
Корпус 1	сварки	2399	2395	292	312,5	287
	виброобработки	2399,5	2395	292	312	287,5
Корпус 2	сварки	2397,5	2394	296,5	321	322
	виброобработки	2397,5	2394	296	321	322,5

Виброобработка производилась виброкомплексом ВК-79; для этого обрабатываемые конструкции (2 редуктора с крышками одновременно) струбцинами закреплялись на специальную стендовую плиту с габаритными размерами 2х6 м². Перед вибрационной обработкой с помощью приборов пульта управления измерены: ток, потребляемый двигателем вибровозбудителя при работе на резонансных частотах; виброускорение, при помощи акселерометра закрепленного на стенде. Критерий окончания процесса виброобработки – стабилизация тока, потребляемого двигателем вибровозбудителя.



а

б

Рис. 4.3. Схема расположения базовых точек для замера деформаций на а) крышке и б) корпусе редуктора

Данные, приведенные в таблице 4.2, показывают, что вибрационная обработка, выполненная взамен термической обработки – отпуска, не искажает габариты сварных узлов редукторов.

4.3. Замена термической обработки вибрационной при сварке клапанов горячего дутья

Учитывая, что степень эффективности влияния виброобработки на величину остаточных напряжений в различных по размерам, марки стали и т. п. может быть различной, была выполнена работа по изучению ее при сварке клапанов горячего дутья (КГД). Надежность работы этих деталей определяется, в основном качеством сварных соединений и стабильностью геометрических размеров. Одним из условий нормальной работы клапанов является стабильность размеров между стенками в корпусе и крышке. Эти размеры изменяются в результате релаксации остаточных напряжений, величина которых после сварки может достигать предела текучести. Для стабильности размеров технологией изготовления предусмотрены времянки и отпуск при 580...600 °С в течение 1...1,5 суток. Замена отпуска виброобработкой позволяла сократить цикл изготовления изделий и несколько уменьшить трудоемкость за счет исключения операций, связанных с термической обработкой, в частности зачистки от окалины. Корпус и крышки (КГД) сваривали ЭШС из листового проката стали 15К толщиной 100 мм. Габаритные размеры корпуса 2275 x 1830 x 460 мм, масса 2400 кг, размеры крышки 1830 x 1235 x 460 мм, масса 1120 кг. Виброобработку выполняли вибратором DV6-12-4E1 с возмущающей силой 25 кН, режим вибрационной обработки корпусов и крышек: для корпуса – число оборотов, соответствующее резонансным частотам 400, 3150, 2500 и 1800 об/мин, величина падения тока нагрузки – 16 % (3...2,4 А), время обработки – 40 мин; для крышки – число оборотов, соответствующее резонансным частотам, – 3500, 2500 и 2000 об/мин; величина падения тока

19 % (2,6...2,1 А), время обработки – 30 мин (2,4 А), время вибрирования – 40 мин; для крышки – число оборотов, соответствующее резонансным частотам, – 3500, 2500 и 2000 об/мин; величина падения тока – 19 % (2,6...2,1 А), время обработки – 30 мин.

Виброобработку осуществляли следующим образом. Изделие (корпус, крышку) жестко крепили на плите, установленной на резиновые прокладки; к плите крепили вибратор и вибрировали плиту вместе с изделием. Остаточные напряжения измеряли прибором ИОН-4М на изделиях непосредственно после сварки, после виброобработки и после окончательной механической обработки. Схема расположения участков и точек для измерения напряжений показаны на рис. 4.4 (номинальные размеры в мм): $A = 1840$; $H = 1300$; $B = 460$; $b = 500$; $d_2 = 196$; $d_4 = 1580$ (справочный). Кроме напряжений, проводили штатные измерения геометрических размеров расстояний между стенками корпуса, используя стандартные средства (нутромер, рулетку, линейку).

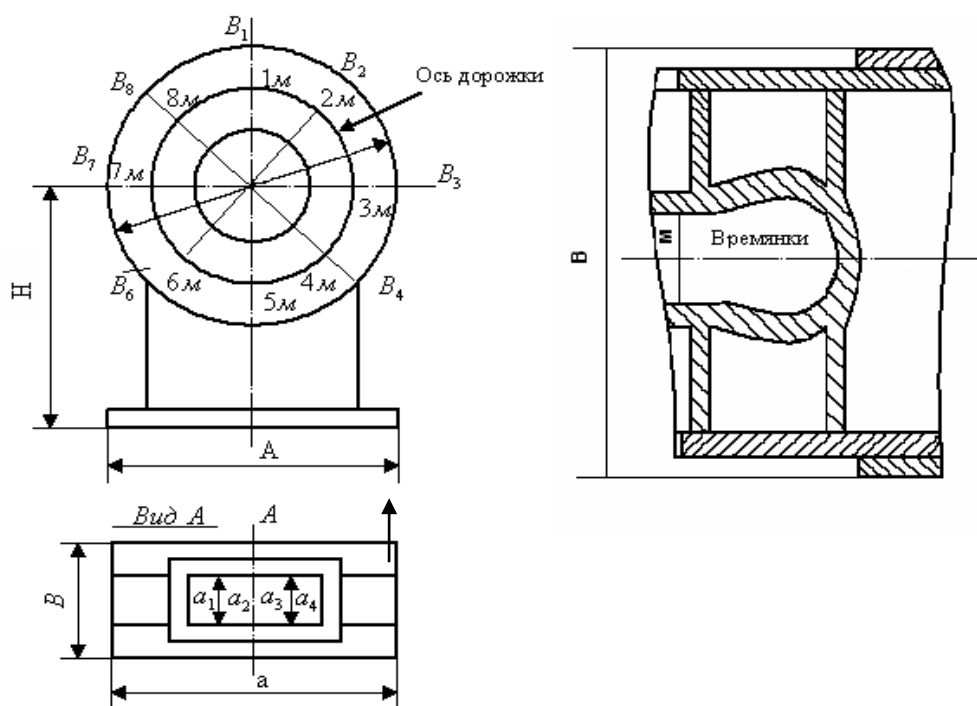


Рис. 4.4. Схема расположения точек для измерения напряжений и геометрических размеров КГД

Для сравнения напряжения и геометрические размеры измеряли на штатных клапанах, подвергающихся термической обработке. Перед замерами напряжений поверхности участков тщательно зачищали сначала

наждачным кругом, а затем шабером с последующей протиркой ветошью. Результаты измерения остаточных напряжений в трех корпусах обработаны и представлены средними значениями на рис. 4.5.

Анализ результатов, приведенных на графиках, показывает, что максимальная величина растягивающих напряжений после сварки на корпусе КГД достигает 200 МПа (точка 1, участок 11, рис. 6.7), что составляет около 90 % предела текучести стали 15К ($\sigma_{02} = 220$ МПа).

Усредненные результаты измерений геометрических размеров приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты измерений геометрических размеров корпусов КГД

Место измерений	Виброобработка		Термообработка после механической обработки	По чертежу
	После механической обработки	После вылеживания (14 суток)		
1 м	155,3	155,58	155,4	156
2 м	155,4	155,60	155,3	156
3 м	155,4	155,6	155,2	156
4 м	155,2	155,4	155,4	156
5 м	155,2	155,3	155,2	156
6 м	155,3	155,6	155,4	156
7 м	155,4	155,6	155,3	156
8 м	155,2	155,4	155,2	156
В ₂	502,0	501,0	501,9	500
В ₄	501,9	501,0	501,0	500
В ₇	500,7	501,8	501,7	500
В ₈	501,9	500,4	500,4	500
а ₁	195,9	196,4	196,0	196
а ₂	194,9	195,1	194,5	196
а ₃	195,9	193,3	195,5	196
а ₄	1575,3	1573,8	1575,6	1575

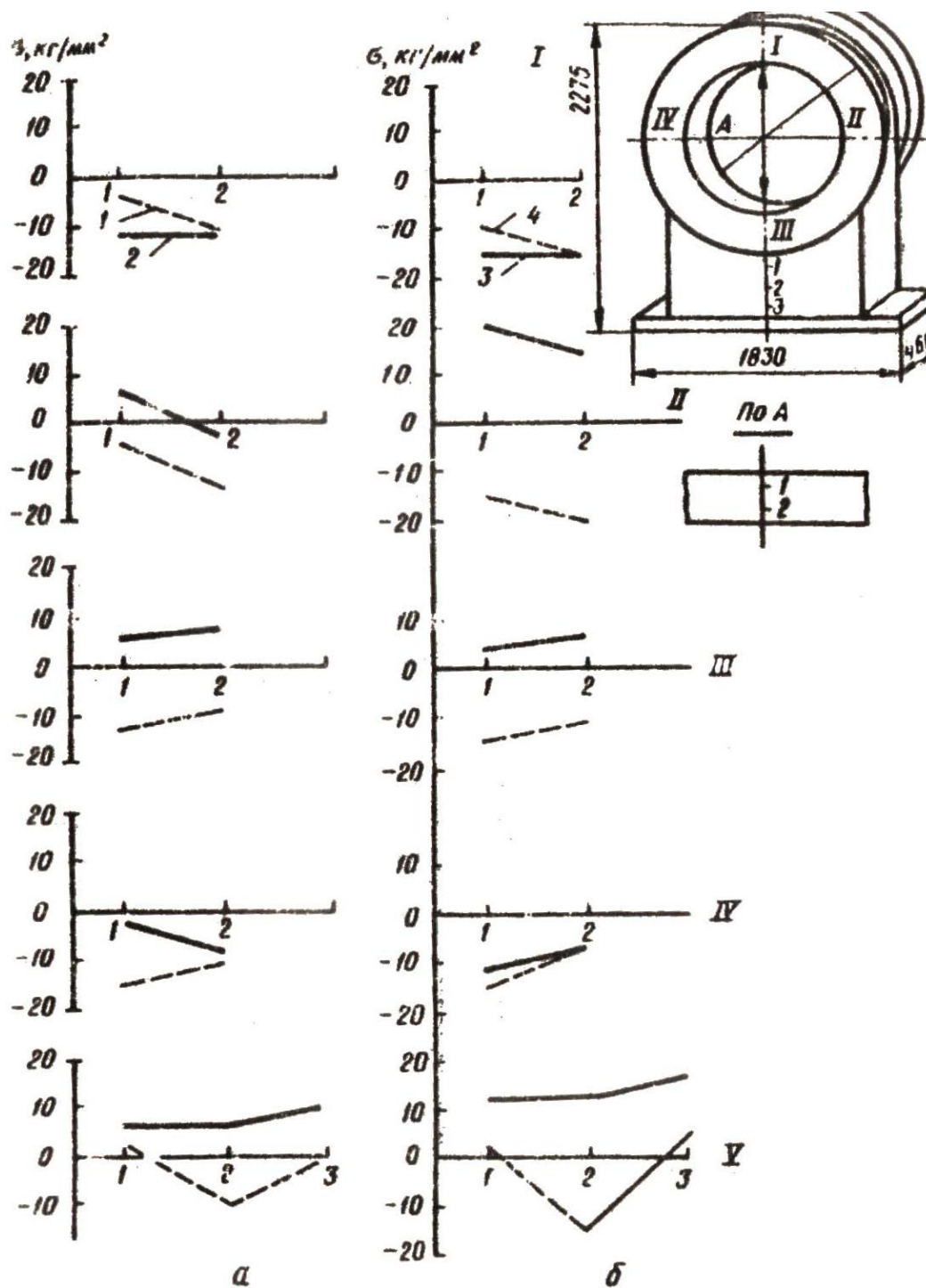


Рис. 4.5. График остаточных напряжений в корпусах КГД:

а – штатная технология;

б – вибрационная обработка;

1 – после термообработки;

2 – до термообработки;

3 – до виброобработки;

4 – после виброобработки.

Сравнительная оценка влияния вибро- и термообработки показывает, что в основном характер изменения остаточных напряжений после обеих обработок на большинстве участков (I, III, V) одинаков. Общая тенденция – снижение величины или изменение знака растягивающих напряжений и в некоторых случаях увеличение сжимающих напряжений (участок IV). На корпусе КГД максимальные растягивающие напряжения +100 МПа, имеющие место после сварки в точках 1, 2 (участок III) и точках 1, 2 и 3 (участок V), перешли в результате термической обработки в сжимающие – 100 МПа (см. табл. 6.1). Вибрационная обработка также изменила знак напряжений: в точках 1, 2 (участок II) напряжения растяжения величиной до +200 МПа, перешли в сжимающие – 200 МПа. Результаты измерений, приведенные в табл. 6.1, показывают, что изменение геометрических размеров после механической обработки, вылеживании в течение 14 суток корпусов КГД, прошедших после сварки термическую или вибрационную обработку, практически одинаковы и находятся в пределах отклонений, предусмотренных техническими условиями чертежа. Отклонение от чертежных размеров: 156, 500, 196 и 1575, указанных в последнем столбце таблицы, составляет ± 2 мм.

4.4. Снижение короблений после сварки методом вибрационного старения

4.4.1. Вибробработка конструкции в свободном состоянии

Один из косвенных признаков снижения остаточных напряжений – снижения величины короблений после сварки, потому некоторые авторы [8, 25, 76, 203- 204] рекомендуют вибрационное старение как один из методов правки. В Донбасской государственной машиностроительной академии были проведены работы по изучению возможности устранения сварочных деформаций методом вибрационной обработки

Была проведена виброобработка сварной конструкции крышки «Ящика батарейного взрывобезопасный типа ЭК -120-РР-440/640 -9», вид сверху которого представлен на рис. 4.6,а.



а

б

Рис. 4.6. - Ящик батарейный взрывобезопасный

В связи с тем, что крышка ящика за счет остаточных напряжений имеет коробление и неплотно прилегает к ящику (см. рис. 4.4,б), то при виброобработке производился контроль кривизны крышки.

Для этого измерялось отклонение от прямолинейного положения на краях крышки (рис. 4.7).

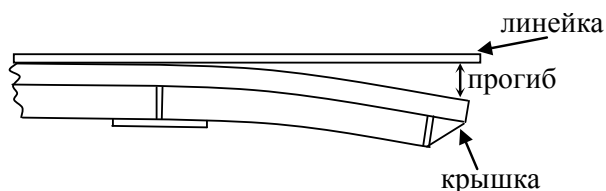


Рис. 4.7. Измерение величины прогиба

Для проведения виброобработки крышка была расположена на двух виброизолирующих опорах (автомобильных покрышках) размещенных по краям. Вибратор располагался максимально близко к геометрическому центру конструкции (Рис. 4.8).



Рис. 4.8.- Конструкция с закрепленным вибратором на опорах

Перед обработкой и после нее был замерен ток потребляемый электродвигателем (дебаланс вибровозбудителя был установлен на 15%).

Виброобработка производилась на первой резонансной частоте равной 6500 об/мин при величине дебаланса 40% (~12 кН), затем повторно при дебалансе 60% (~18 кН), при этом потребляемый ток снизился с 45А до 33А (при 40%) и с 40А до 33 А (при 60%), что косвенно свидетельствует о снижении остаточных напряжений.

Результаты измерений представлены в виде таблицы 4.4 и графика на рис. 4.9.

Таблица 4.4.

Зависимость потребляемого двигателем тока от частоты вращения

Потребляемый ток	Частота, об/мин								
	3000	3500	4000	4500	5000	5500	5750	6000	6500
До виброобработки, А	7	8	7	7	7,5	10,5	25	18	33
После виброобработки, А	5,5	7,4	9	6,5	6,5	7	7,5	8	8,5

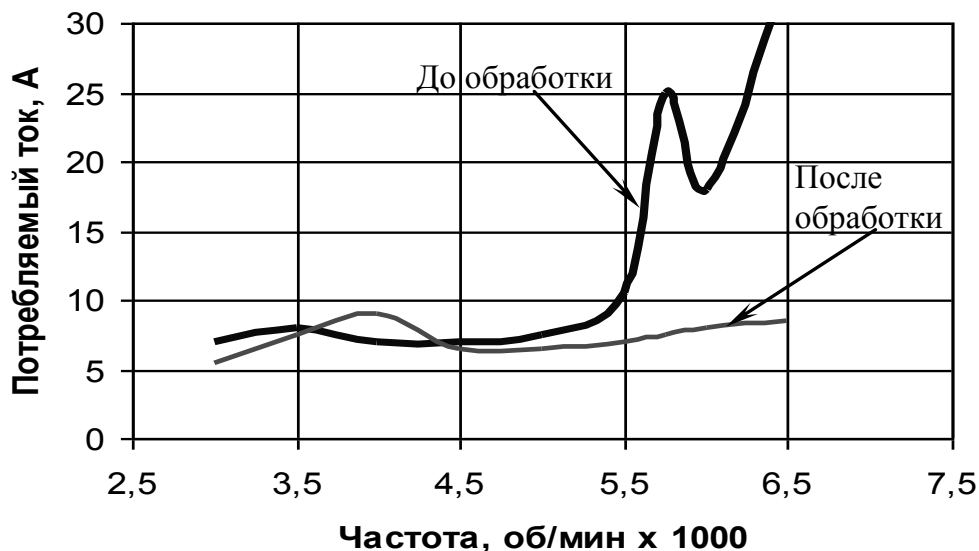


Рис. 4.9.- График зависимости потребляемого двигателем тока от частоты вращения

В результате эксперимента величину коробления удалось уменьшить с 17,2мм до 11,2мм на одном из концов крышки и с 13мм до 8,2мм на втором, что не отвечает техническим условиям к изготавливаемой конструкции.

4.4.2. Виброобработка конструкций с использованием дополнительных приспособлений

Исследования проводились на сварной колонне, которая представляет собой коробчатую конструкцию (толщина стенки 10 мм) с вваренными усиливающими элементами – мембранами толщиной 6 мм (рис.4.10-4.11).

При варке мембран, во время изготовления конструкции, в стенках конструкции после сварки возникли коробления. Для обеспечения заданной формы конструкции, данные коробления необходимо было снизить до наварки верхней полки.

Для снижения короблений была выбрана следующая схема обработки: вдоль стенки через прокладку был проложен и прикреплен струбцинами швеллер № 14 (рис. 4.11) таким образом, чтобы стенка приняла прямолинейное положение (струбцины на рис 4.11. показаны в незатянутом положении).

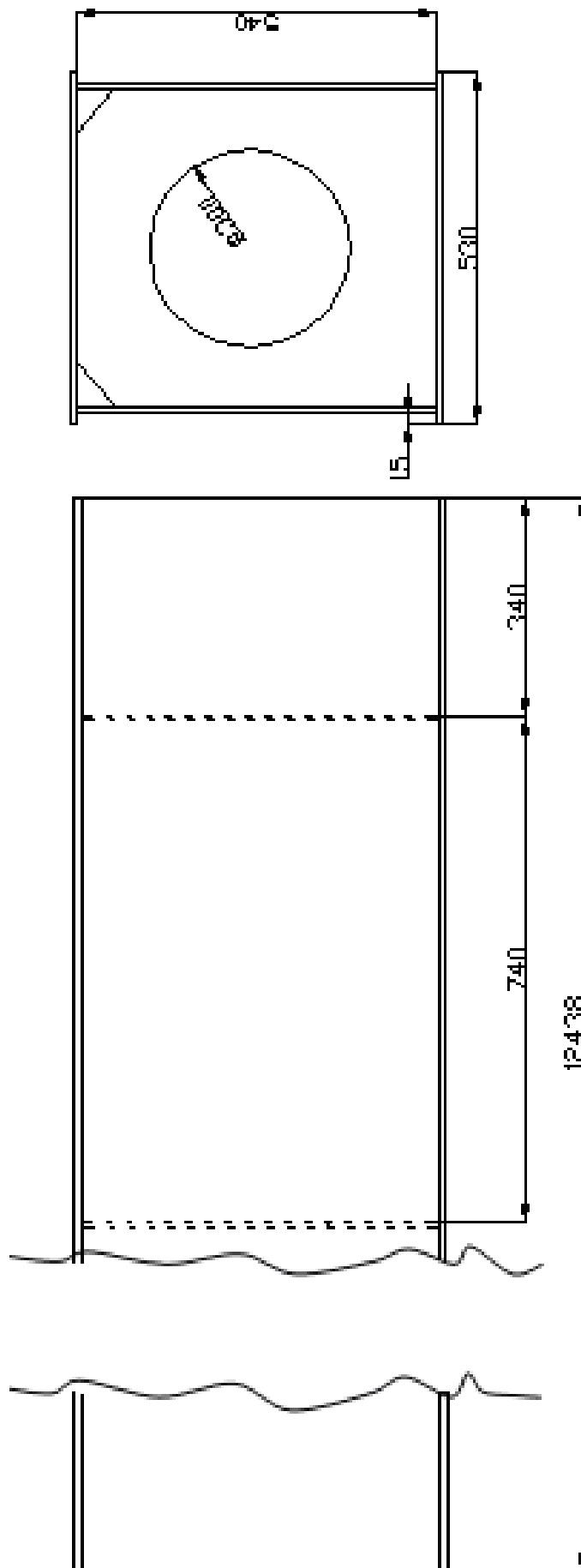


Рис. 4.10 Эскиз колоны

При деформировании стенки возникли внутренние напряжения, которые необходимо было снизить в процессе виброобработки.



Рис. 4.11 Общий вид колонны без верхней полки

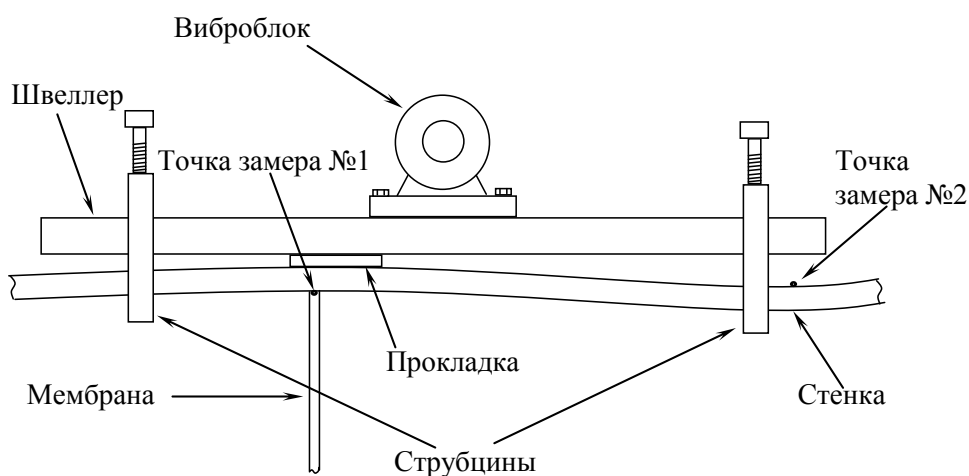


Рис. 4.12 - Схема закрепления виброблока

Виброблок виброкомплекса ВК-90 был прикреплен непосредственно к швеллеру болтами М20, пропущенными в предварительно просверленные отверстия. Значение дебаланса было установлено 10 %, что дало развиваемое виброусилие порядка 3 000 Н.

Величина короблений замерялась как расстояние от линейки, длиной 1 м, проложенной вдоль стенки до самой стенки (рис 4.13).

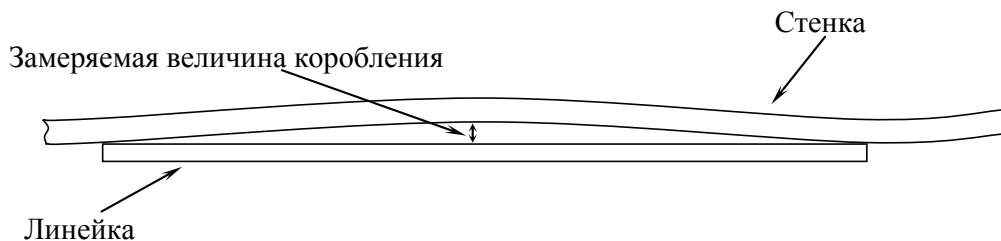


Рис. 4.13 - Схема измерения коробления

Обработка производилась виброкомплексом на первой резонансной частоте в течении 25 мин. В процессе виброобработки ток, потребляемый двигателем виброблока, снизился с 50 до 35 ампер (напряжение питание двигателя 27В). Полученные значения короблений до обработки и после виброобработки представлены в виде таблицы 4.5.

Как показывают результаты, коробления удалось снизить примерно на 20%. Для снижения на большую величину жесткость эталонной прямолинейной конструкции должна быть значительно выше жесткости элемента конструкции, подвергаемого правке, что не было обеспечено при использовании в качестве эталонной конструкции швеллера № 14.

Таблица 4.5.

Величины короблений стенки колонны, мм.

№ точки замера	После сварки	После виброобработки
1	4	3
2	3,5	2,8

Как показали проведенные исследования, методом вибрационного старения возможно достигнуть снижения величины сварочных деформаций, но обеспечить полное восстановление заданных геометрических размеров при этом не удалось, для этого необходимо применение специализированных конструкций [25,48, 77,197].

РАЗДЕЛ 5.

ВЛИЯНИЕ ВИБРООБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. Снижение напряжений в балках двутаврового поперечного сечения

В научно-исследовательском институте проблем тяжелого машиностроения (НИИПТмаш, г. Краматорск) были проведены исследования процесса вибрационной обработки для сварных балок двутаврового поперечных сечений.

Балки изготовляли из проката стали 10ХСНД толщиной 8мм. Размер балок показан на рис.5.1. Сварку балок осуществляли в среде CO_2 проволокой СВ-08Г2С, 2мм на режиме: сварочный ток-300А, скорость подачи проволоки-215м/ч; напряжение-26-28В.

Для предотвращения налипания брызг поверхности заготовок, прилегающие к свариваемому стыку, обмазывали меловым раствором. Приварку нижней и верхней полок к вертикальной стенке производили в направлении от середины к краям, катетом 6мм. Ребра толщиной 6мм приваривали односторонним швом со стороны противоположной площадки для измерения напряжений.

Прихватку элементов балки друг к другу осуществляли электродами УОНИ- 13/45, Ø 3мм на токе-120А, напряжении 27В. Всего было сварено 3 балки, из которых на балке №1 после сварки - произведено измерение напряжений при помощи прибора ИОН-4м [202] и для сравнения рентгеновским способом, на балке №2 после сварки измерены напряжения прибором ИОН-4м, произведена вибрационная обработка и выполнено измерение напряжений рентгеновским методом и прибором: ИОН-4м; на балке №3 после сварки измерили напряжения, произвели вибрационную обработку с разным временем вибрирования и последующим измерением коэффициентов магнитной проницаемости прибором ИОН-4м. Затем путем обработки кривых изменения были получены эпюры остаточных напряжений. Напряжение на всех балках измеряли в верхнем поясе в 5 ти точках(1-5) и 5 местах по длине балки.

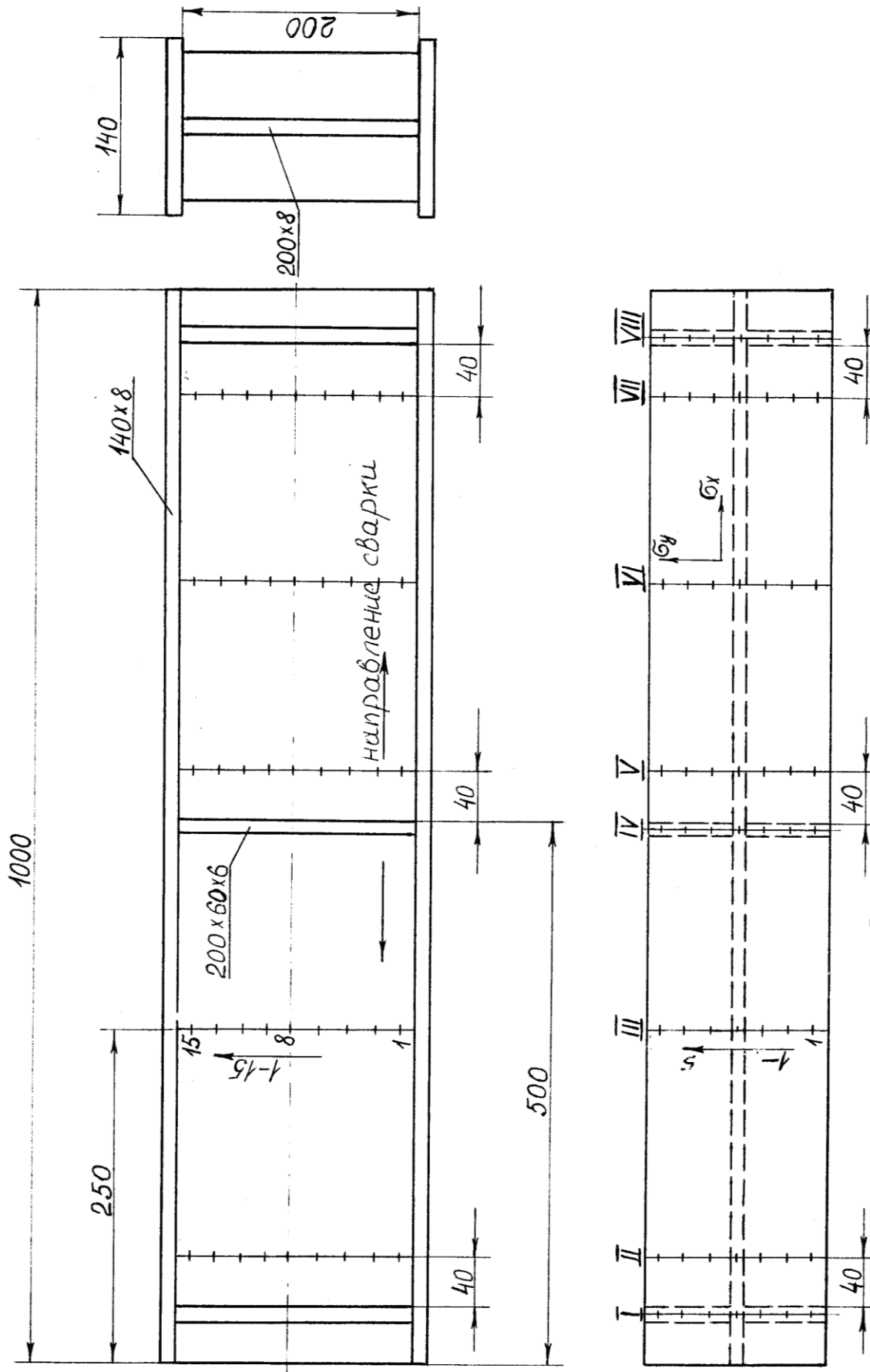


Рис. 4.1. Общий вид двуглавленной балки

Вибратор с помощью струбцин крепили к балке, затем балку подвешивали на кронштейн и производили виброобработку.

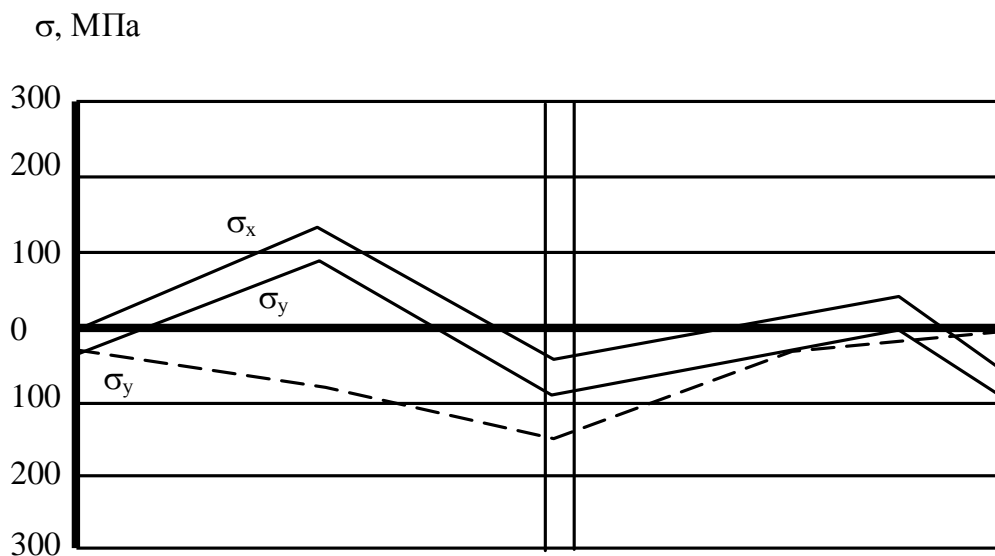
Для балки №2 частоты, на которых производилась обработка (таблица 5.1.), были приняты равным резонансным и приведены в Причём, обработка производилась таким образом, чтобы на первой из обрабатываемых частот была максимальная амплитуда вынуждающей силы. Время приложения динамической нагрузки на каждой частоте определялось по падению тока в двигателе. После стабилизации величины тока обработку прекращали.

Таблица 5.1

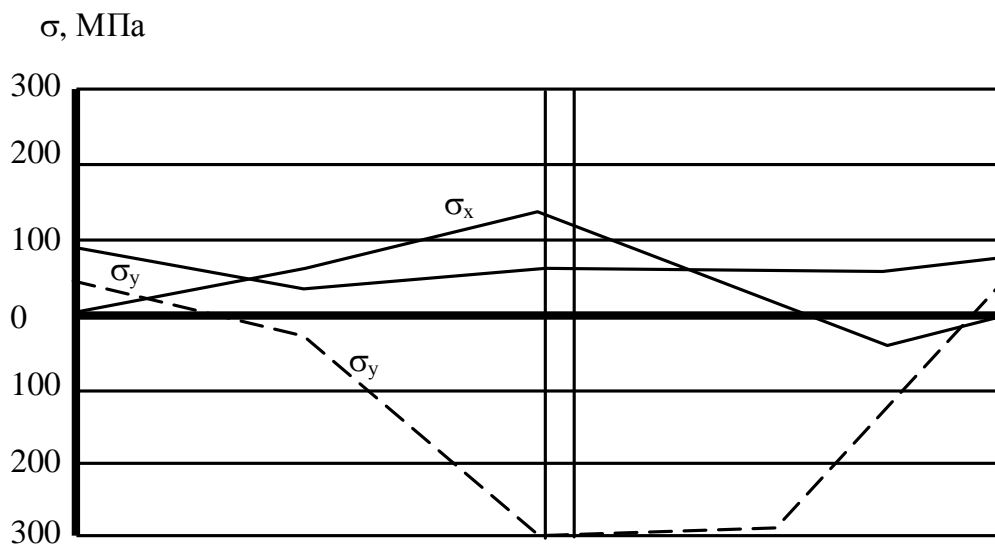
n, об/мин	Сила тока, А		Падение силы тока, %
	До обработки	После Обработки	
4400	5	4,4	12
3400	4,25	3,91	8
2750	4	3,85	3,75
1850	3,8	3,3	13,16

Время виброобработки и стабилизации тока во всех случаях составляло 15 мин. Эпюры напряжений на балке №1 непосредственно после сварки представлены на рис. 5.2.-5.5. Сплошными линиями показаны напряжения действующие вдоль балки σ_x и поперек балки σ_y , измеренные рентгеновским методом, штриховыми прибором ИОН-4м(2). На рисунке видно, что характер распределения продольных напряжений (σ_x) в местах расположения ребер (I, IV, VIII) идентичен: в начале (т.1) напряжения близки к нулю, затем имеют знак "+" увеличиваются, достигая 150 МПа (т.2. участок I). В месте расположения вертикальной стенки (т.3) продольные напряжения меняют знак, переходя в сжимающие, и достигают величины около 100 МПа. Затем характер изменения их повторяется. Максимальное значение растягивающих продольных напряжений составляет 200 МПа в т.4 на участке IV. Поперечные, напряжения (σ_y) измеренные рентгеновским способом (линия I) на участках I, IV, VIII - сжимающие и имеют максимальную величину

200 МПа- на конце балки (участок VIII) в месте расположения вертикальной стенки (т.3).



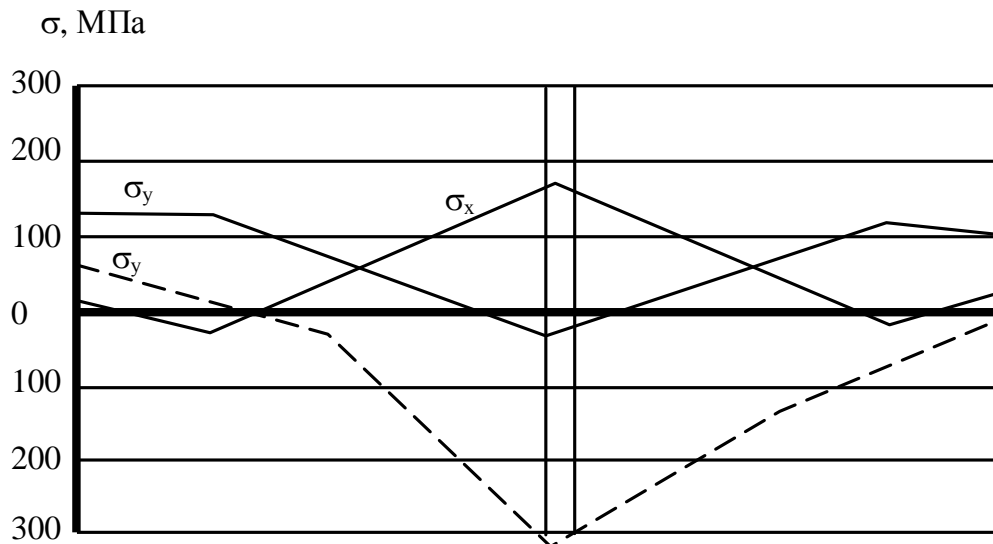
а)



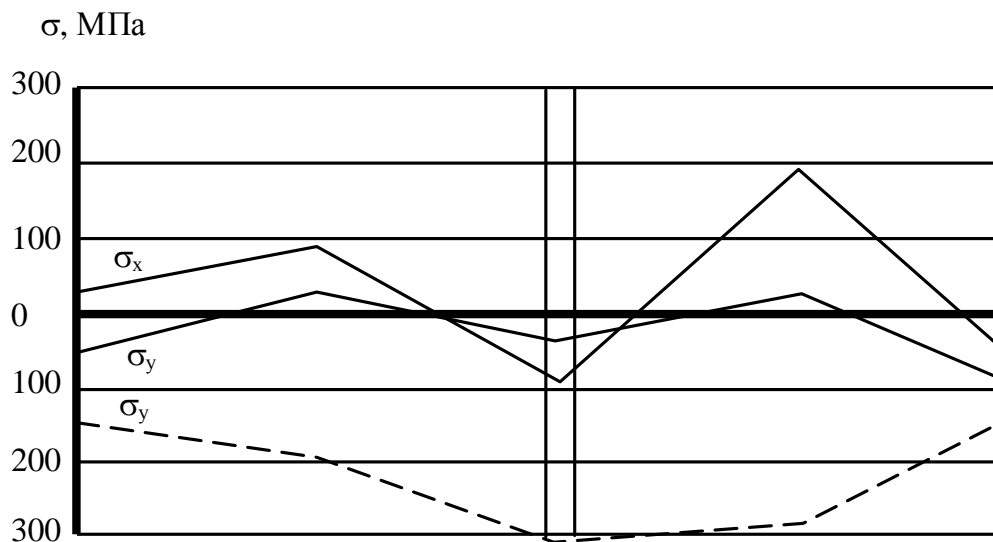
б)

Рисунок 5.2. Эпюры остаточных напряжений на балке вдоль
а) линии I, б) линии II

В целом следует заметить, что на некоторых участках (II, IV, V) отсутствует корреляция между напряжениями измеренными прибором ИОН-4М (линии 2) и рентгеновским способом (линия 1). Причиной этому могут быть ошибки при выполнении измерений.



в)

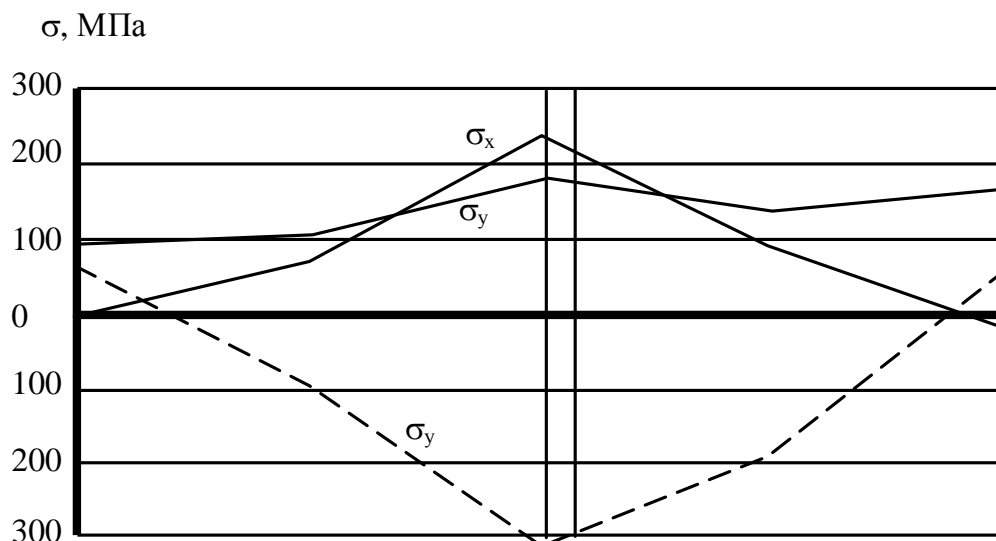


г)

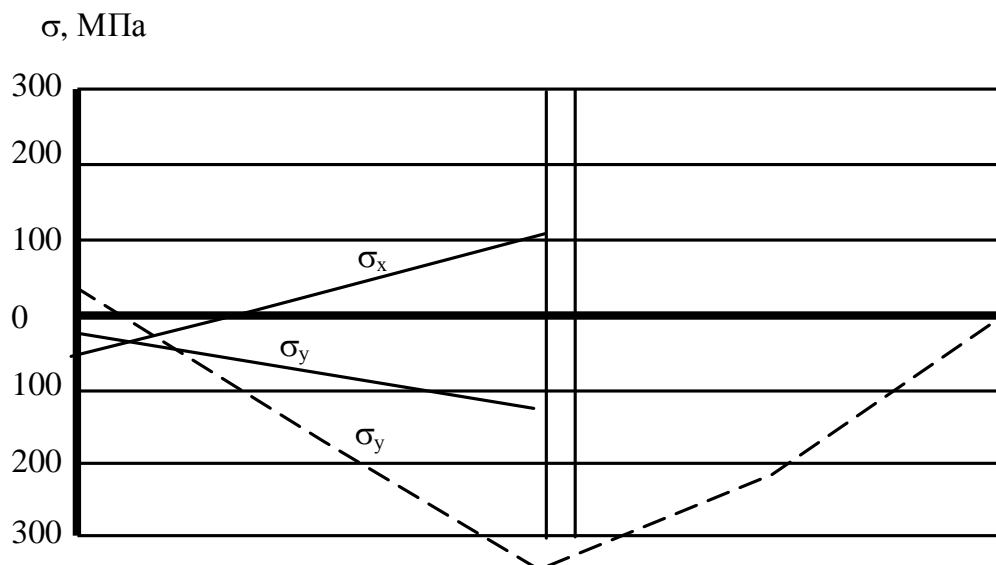
Рисунок 5.3. Эпюры остаточных напряжений на балке вдоль
а) линии III, б) линии IV

Измерение напряжений рентгеновским методом на балке №2 до и после вибрационной обработки показали, что вибрационная обработка влияет на остаточные напряжения на разных участках балки по-разному (рис.5.6). По концам балки (участки I и VIII) в месте расположения вертикальной стенки величина сжимающих поперечных напряжений

увеличилась от 100 до 180 МПа - на участке V, с 0 до 200 МПа - на участке III и с 0 до 150 МПа-на участке I.



г) линия

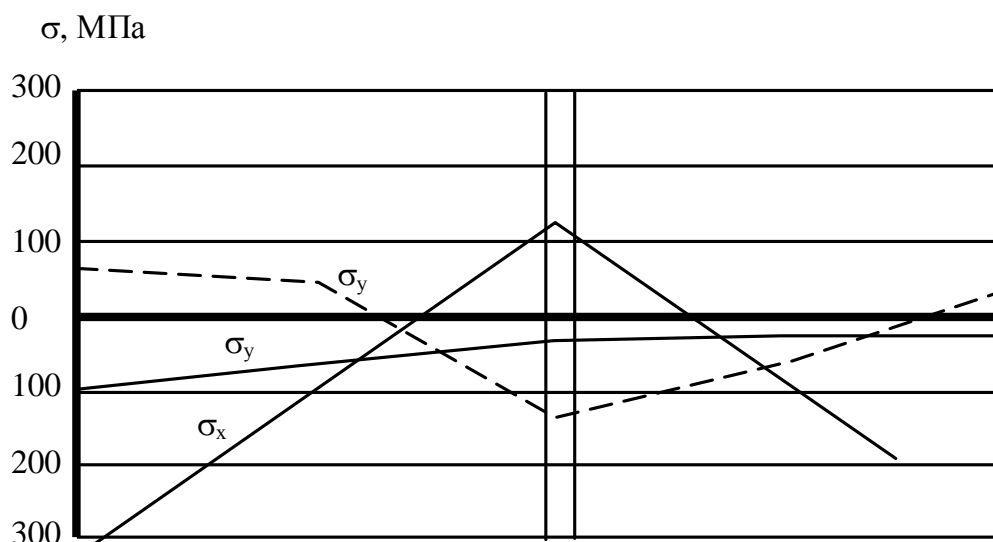


д) линия

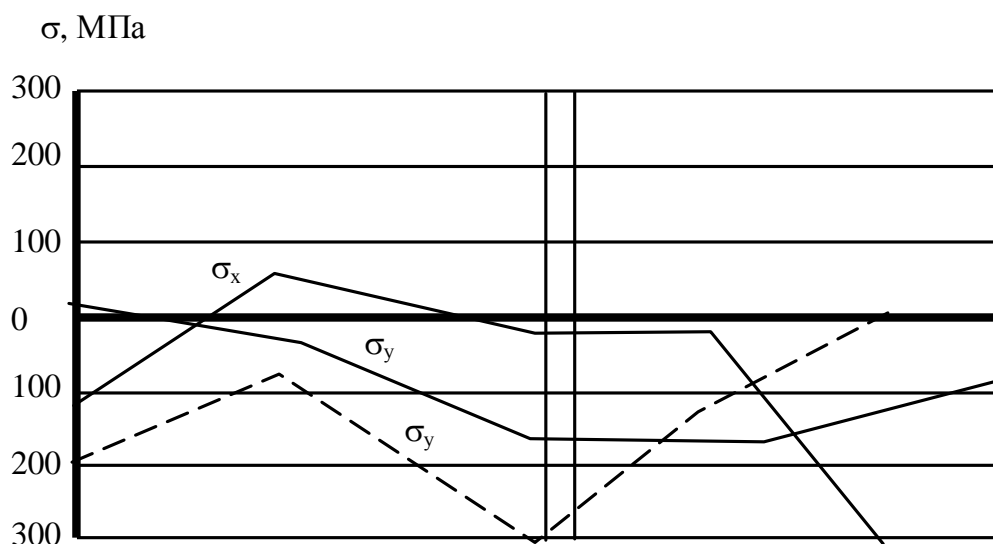
Рисунок 5.4. Эпюры остаточных напряжений на балке вдоль
а) линии V, б) линии VI

Максимальные растягивающие напряжения $\sigma_y = 150$ МПа на участке III после вибрационной обработки уменьшились до 0. Существовавшие в балке растягивающие напряжения на участках I, III- VII после виброобработки приобрели характер сжимающих. Оценивая влияние

виброобработки на уровень остаточных поперечных напряжений, можно сказать, что она изменяет напряженное состояние сварной конструкции, создавая в ней сжимающие напряжения. То же самое можно сказать о характере продольных напряжений (σ_x) действующих вдоль балки. На большинстве участков (I-III, V,VI) продольные растягивающие напряжения перешли в сжимающие (рис. 5.6).



г) линия



г) линия

Рисунок 5.5. Эпюры остаточных напряжений на балке вдоль
а) линии VII, б) линии VIII

Изучение влияния времени виброобработки на уровень остаточных напряжений проведено на балке №3: продолжительность первой, виброобработки-10 мин, второй-20 и третьей~40 мин. После каждой виброобработки измеряли напряжение прибором ИОН-4м.

Результаты измерений, представленные на рис 5.7, показывают, что время обработки влияет на остаточные напряжения в балке. Причем это влияние сказывается при увеличении продолжительности приложения нагрузки свыше 10 мин. При увеличении времени с 10 до 20 мин происходит заметное изменение напряжений. Дальнейшее увеличение времени вибрирования до 40 мин не оказывает влияния на уровень остаточных напряжений. Следовательно, продолжительность процесса вибрационной обработки может составлять от 20 до 40 мин, после чего обработку можно заканчивать.

5.2. Сравнительная оценка влияния вибро и термообработки на остаточные напряжения в тавровой балке

Тавровые балки с габаритными размерами $108 \times 135 \times 1000$ мм сваривали из листового проката стали Ст 3, (рис 5.8). Толщина листов полок и стенок составляла 8 мм. Одну часть балок подвергали после сварки термической обработке – отпуску при температуре $500-600$ °С, другую – вибрационной обработке на резонансных частотах в подвешенном состоянии (рис. 5.2). При проведении исследований вибратор закрепляли в центре тяжести балок, подвешивание осуществлялось за корпус вибратора – такая схема была выбрана для того, чтобы балки не деформировались под весом виброблока.

Для создания колебаний использовался вибровозбудитель DV-3-6-1E1 производства фирмы «Martin Engineering». Усилие, развиваемое вибровозбудителем ~ 15 кН [76]. Виброобработка была проведена на первой резонансной частоте, при этом количество оборотов, которое соответствует резонансу, составило 536 об/мин для тавровой балки и 606 об/мин для двутавровой.

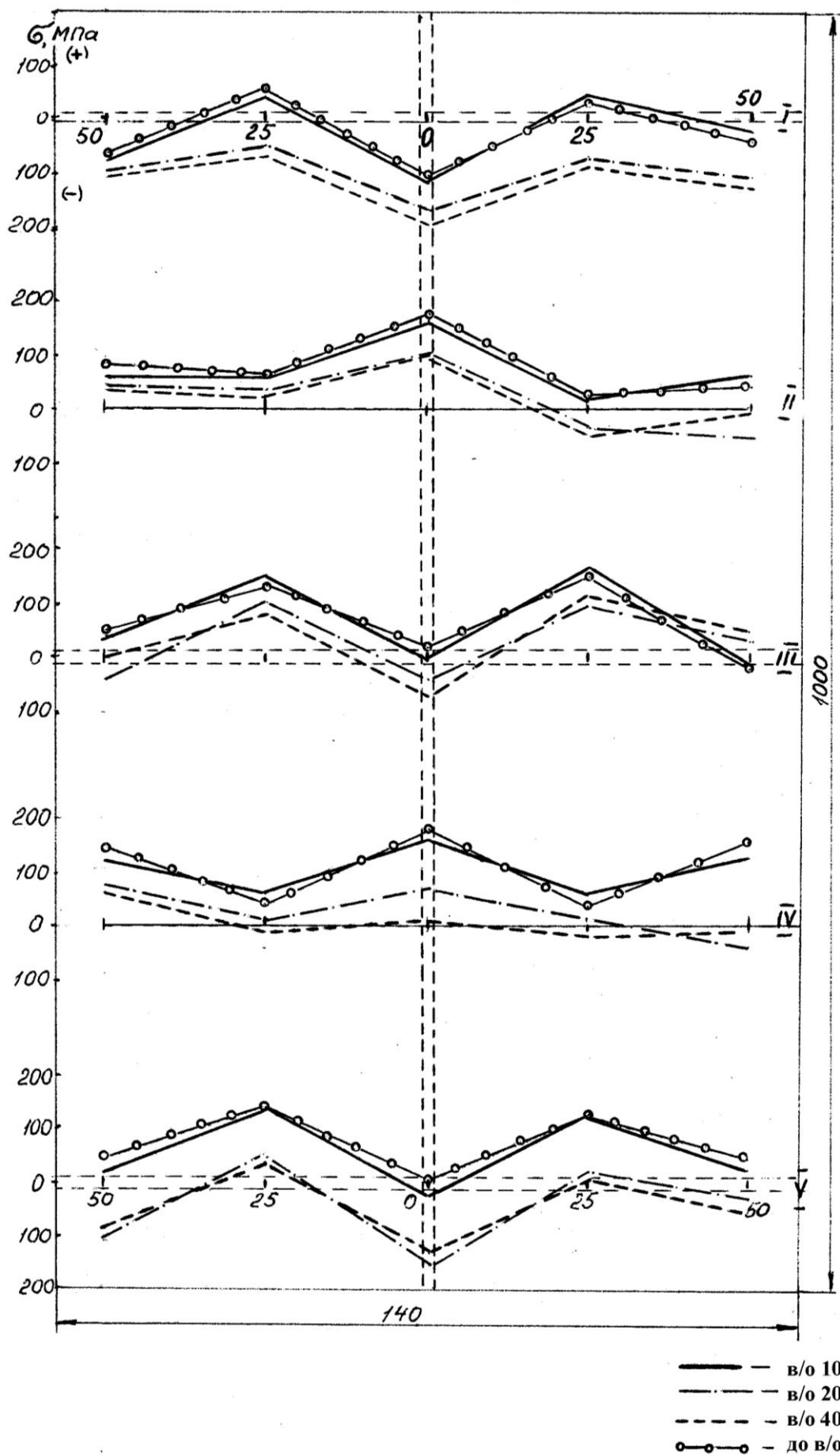


Рисунок 5.7. Эпюры остаточных напряжений в верхнем поясе балки 3

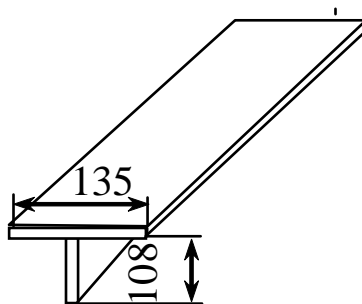


Рис. 5.8. Чертеж балок.

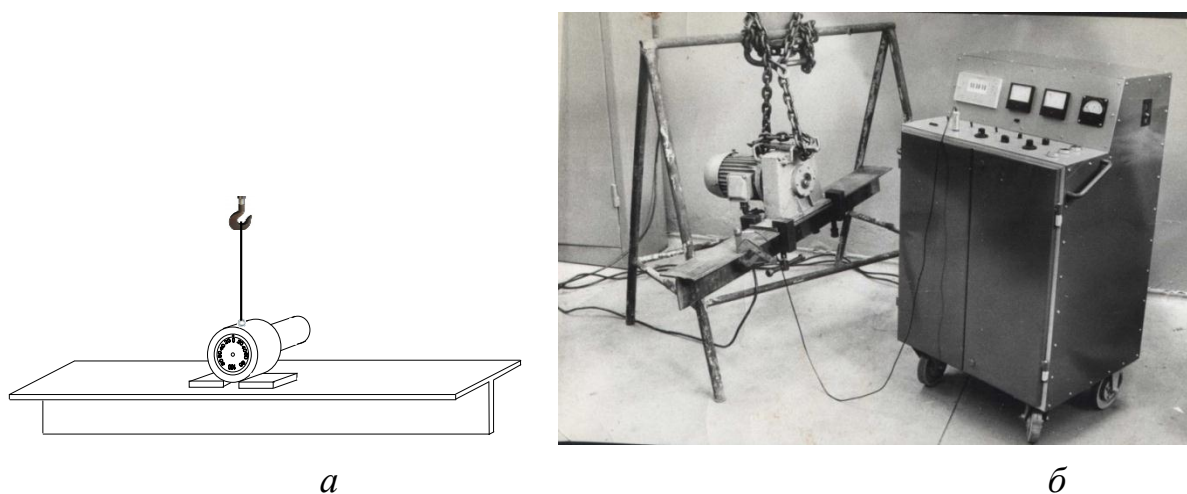


Рис. 5.9. Схема (а) и фото (б) закрепления балки.

Остаточные напряжения оценивались магнитоупругим методом с помощью прибора ИОН-4м. Измерения проводились на верхних полках балок. Результаты оценки приведены в виде эпюр остаточных напряжений (рис. 5.10 -5.11), где ось z – продольная ось балки, сплошная линия – остаточные напряжения после сварки; штрихпунктирная – после вибрационной обработки (20 000 циклов); штриховая – после термообработки.

Оценивая эффективность метода вибрационного старения, можно отметить, что после вибрационной обработки была зафиксирована релаксация остаточных напряжений в среднем на 25 %, в тоже время термическая обработка обеспечивает снижение напряжений.

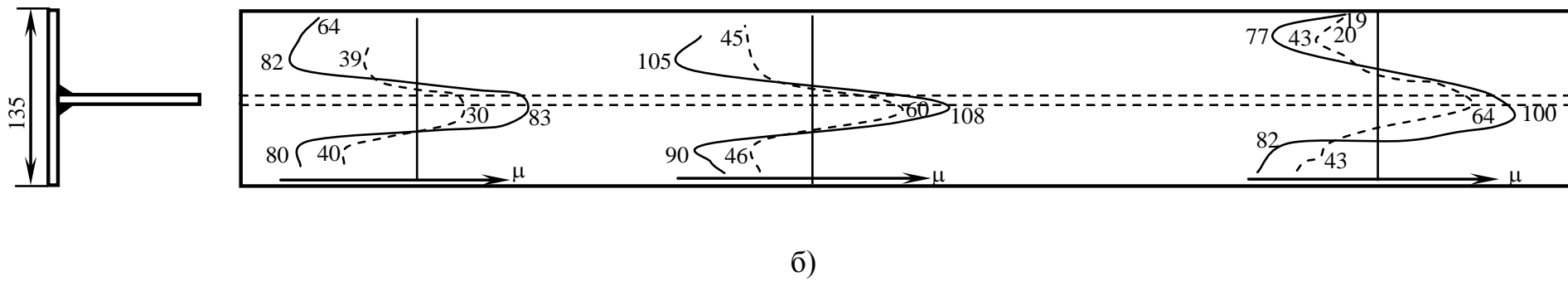
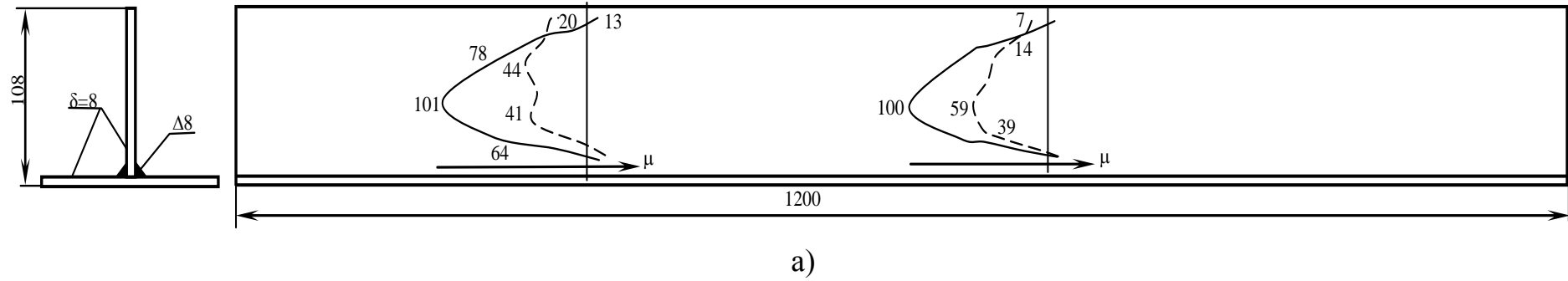
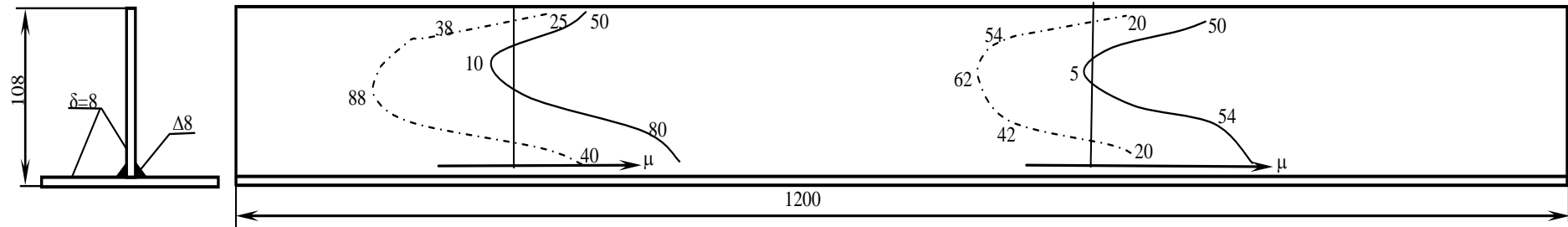
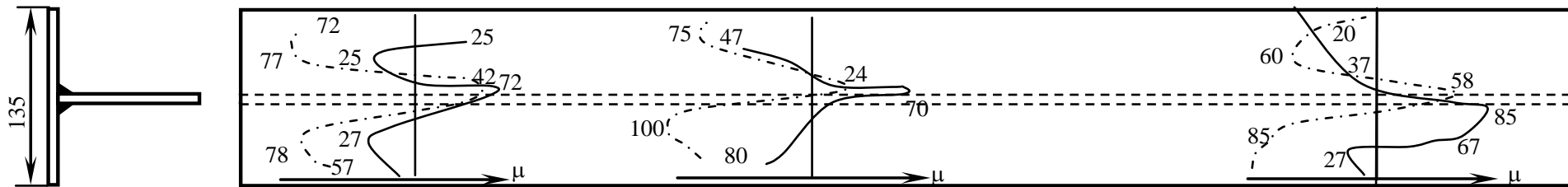


Рисунок 5.10. Эпюры напряжений после сварки и термообработки



a)



б)

Рисунок 5.11. Эпюры напряжений после сварки и виброобработки

В то же время показано (рис. 5.11), что металл претерпевший после сварки растяжение после виброобработки получил напряжения сжатия. При этом вибрационное старение дает практически десятикратную экономию времени и тысячекратную экономию по расходу энергоресурсов по сравнению с термическими методами релаксации.

5.3. Влияние виброобработки на остаточные напряжения в опоре свода доменной печи

На Донецком металлургическом заводе (цех металлоконструкций) была проведена виброобработка сварной опоры, общий вид которой приведен на рисунке 5.12.

В конструкции балки были произведены некоторые изменения: в точке 7 был подварен кронштейн для крепления вибратора, который после виброобработки был удален (рис. 5.13).

С целью изолирования от воздействия внешних факторов опора подвешивалась за проушины на тросах (рис. 5.14).

Виброобработка производилась виброкомплексом ВК 93-МЗ. Перед обработкой с приборов пульта управления виброкомплекса производились измерения:

- тока, потребляемого двигателем вибровозбудителя при работе на резонансных частотах;
- виброускорения при помощи акселерометра, закрепленного на детали.

После завершения процесса вибрационного старения опоры еще раз были измерены ток и виброускорение. Результаты эксперимента приведены в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2

Изменение остаточных напряжений

Значение	Номер датчика					
	1	2	3	4	5	6
σ , МПа	22	10	28	8	80	22

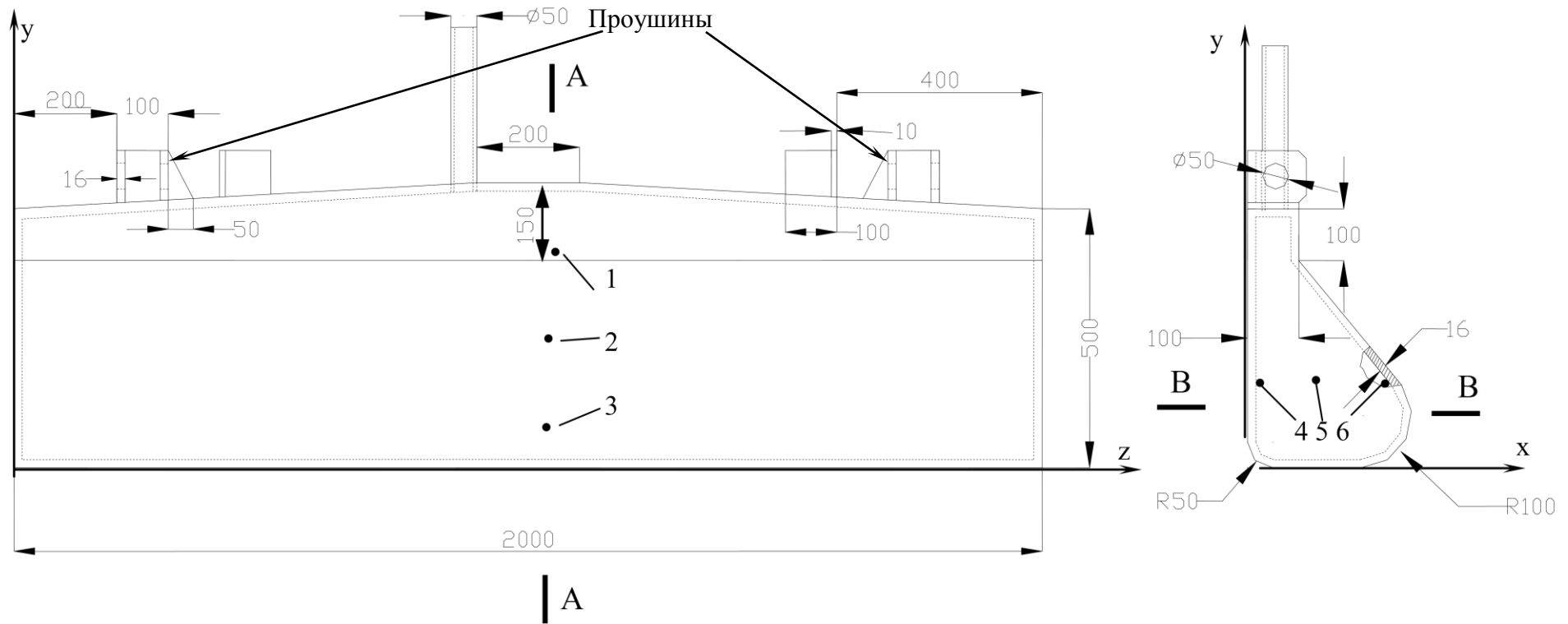


Рис. 5.12. Чертеж опоры: 1–6 – точки крепления тензодатчиков.

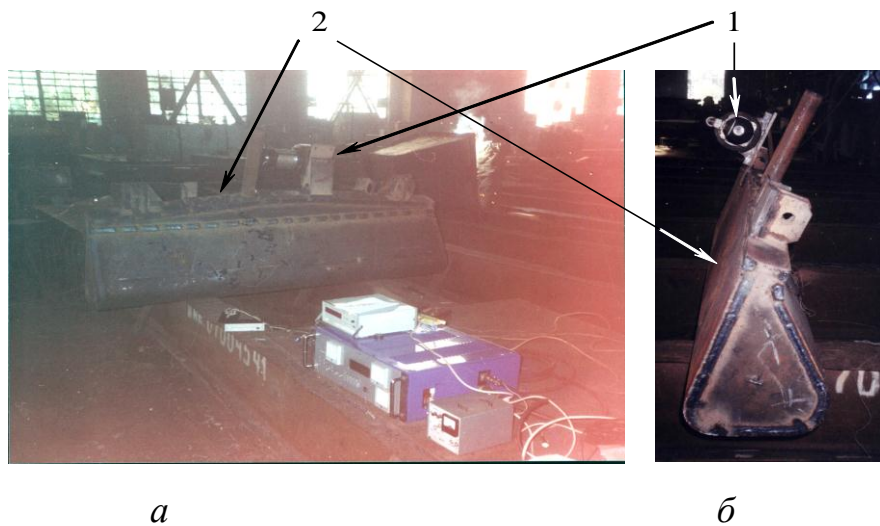


Рис. 5.13. Закрепление вибратора 1 на обрабатываемой конструкции 2.



Рис. 5.14. Закрепление обрабатываемой конструкции.

Изменение остаточных напряжений регистрировалось при помощи тензостанции ИДЦ-1 и тензорезисторов 2ПКП-30-200ГБ сопротивлением 199 Ом, места закрепления которых указаны на рис. 5.12. Тензорезисторы

были подключены по несбалансированной мостовой схеме, симметричной относительно питающей диагонали (рис. 3.3).

Таблица 5.3

Изменение частоты и потребляемого тока

Частота	Возбуждающая сила, кН	Количество об/мин, соответствующее резонансу		Потребляемый ток, А	
		До обработки	После	До обработки	После
1	16,2	5400	5100	8	6
2	20,7	6900	6400	9	7
3	22,5	7500	7400	12	10

Результаты эксперимента, полученные с помощью тензометрии (табл. 5.2), подтверждают снижение остаточных напряжений (прямой метод). Косвенным признаком этого является снижение потребляемого тока двигателя [41–55].

Разница между полученными экспериментальными и расчетными максимальными значениями изменения остаточных напряжений находится в пределах допустимой погрешности.

5.4. Изучение напряжений на корпусах редукторов

Данные работы осуществлялись ПО «Уралмаш». Существующая технология изготовления сварных корпусов редукторов предусматривает выполнение следующих операций: сварка основания и крышки; обработка с припуском плоскостей разъема; сборка основания и крышки на прихватках; обработка отверстий с припуском; термическая обработка - отпуск для стабилизации размеров; разборка корпуса; чистовая обработка плоскостей разъема на основании и крышки; сборка корпуса и чистовая обработка отверстий. При изучении напряжений термическая обработка заменялась на вибрационную. Напряжения измеряли до и после

вибрационной обработки прибором ИОН-4М. Эксперименты по измерению напряжений осуществляли на крышках и корпусах (основаниях) редукторов, для которых виброобработку осуществляли по отдельности, производили чистовую обработку плоскостей разъема, после чего собирали вместе на прихватках и производили чистовую механическую обработку отверстий.

Перечень изделий прошедших вместо термической вибрационную обработку для изучения напряжений приведены в табл.4.3. Материал сталь 10ХСНД.

Таблица 5.4.

Перечень узлов редукторов, прошедших виброобработку на ПО
"Уралмашзавод"

№	Наименование	Заказ	Чертеж	масса, кг	Кол-во, шт.
1	Крышка редуктора	160074.011	407191057	326	1
2	Корпус редуктора	160074,011	407191041	616	2
3	Редуктор в сборе	163701079'	407191057	1000	1
4	Редуктор в сборе	163701079	407191472	2050	2
5	Редуктор в сборе	16705В016	140710140	1700	1
6	Редуктор в сборе	167341077	407610270	1900	1

Виброобработку осуществляли вибратором DV3- 6-1/7R в цехе 40 БЦСМК. Места расположения вибратора на изделиях показаны на схеме рис. 4.3, 5.15-5.16 . Режимы вибрационной обработки изделий приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5.

Режимы вибрационной обработки редукторов

Наименование	$n_{рез.}$, об/мин	I_H, A	I_K, A	t, мин	Место- расположение вибратора
1	2	3	4	5	6
I. Крышка редуктора черт.407191057	3800	5,8	5,6	10	Рис 4.3,а.
	3250	4,5	4,2	5	
	1900	3,6	3,4	5	

Таблица 5.5(продолжение)

1	2	3	4	5	6
2. Корпус редуктора черт.407191041	4400	5,2	4,95	10	Рис 4.3,б
	3450	4,55	4,4	5	
	1500	1,95	18	5	
3. Корпус редуктора черт.407191041	3350	4,5	4,2	10	Рис 4.3,б
	3200	4,4	395	10	
	2600	4,0	3,9	5	
	1500	3,0	282	5	
4•Редуктор в сборе черт.407191057	4230	2,6	2,4	8	Рис 5.15,а
	3900	2,25	2,2	10	
	3500	2,0	1,95	'8	
5. Редуктор в сборе черт.407191472	4500	3,1	2,65	10	Рис 5.15,б
	3000	2,1	2,05	10	
	4500	2,8	2,5	10	
	2800	1,9	1,9	10	
6. Редуктор в сборе черт.407191472	4800	2,9	2,58	10	Рис 5.15, б
	3800	2,3	2,1	10	
	4500	2,5	2,4	10	
	3600	2,1	2,1	5	
7. Редуктор в сборе черт.1400710140 1400710200	4800	3,0	2,65	10	Рис 5.16а
	3500	2,2	2,15	10	
	4600	2,6	2,5	10	
	3000	1,95	1,9	10	
8. Редуктор в сборе черт.407610270 407610410	4700	3,0	2,75	10	Рис. 5.16, б
	4000	2,45	2,35	10	
	4800	2,8	2,55	10	
	3600	2,2	2,15	10	

В табл. 5.5. значения $n_{рез}$ - числа оборотов двигателя, соответствующие резонансной частоте; I_H , I_K - величины тока в начале и конце процесса виброобработки; t - время виброобработки.

Результаты измерения напряжений предоставлены в табл.5.6.

Анализ полученных результатов показывает, что после сварки в сварных узлах редукторов образуются высокие растягивающие напряжения. В крыже редуктора на участке II в т.2. величина их составила 220 МПа или 50-60% предела текучести стали 10ХСНД. На корпусе максимальные значения растягивающих напряжений 130 МПа получены на участке I в т.2.

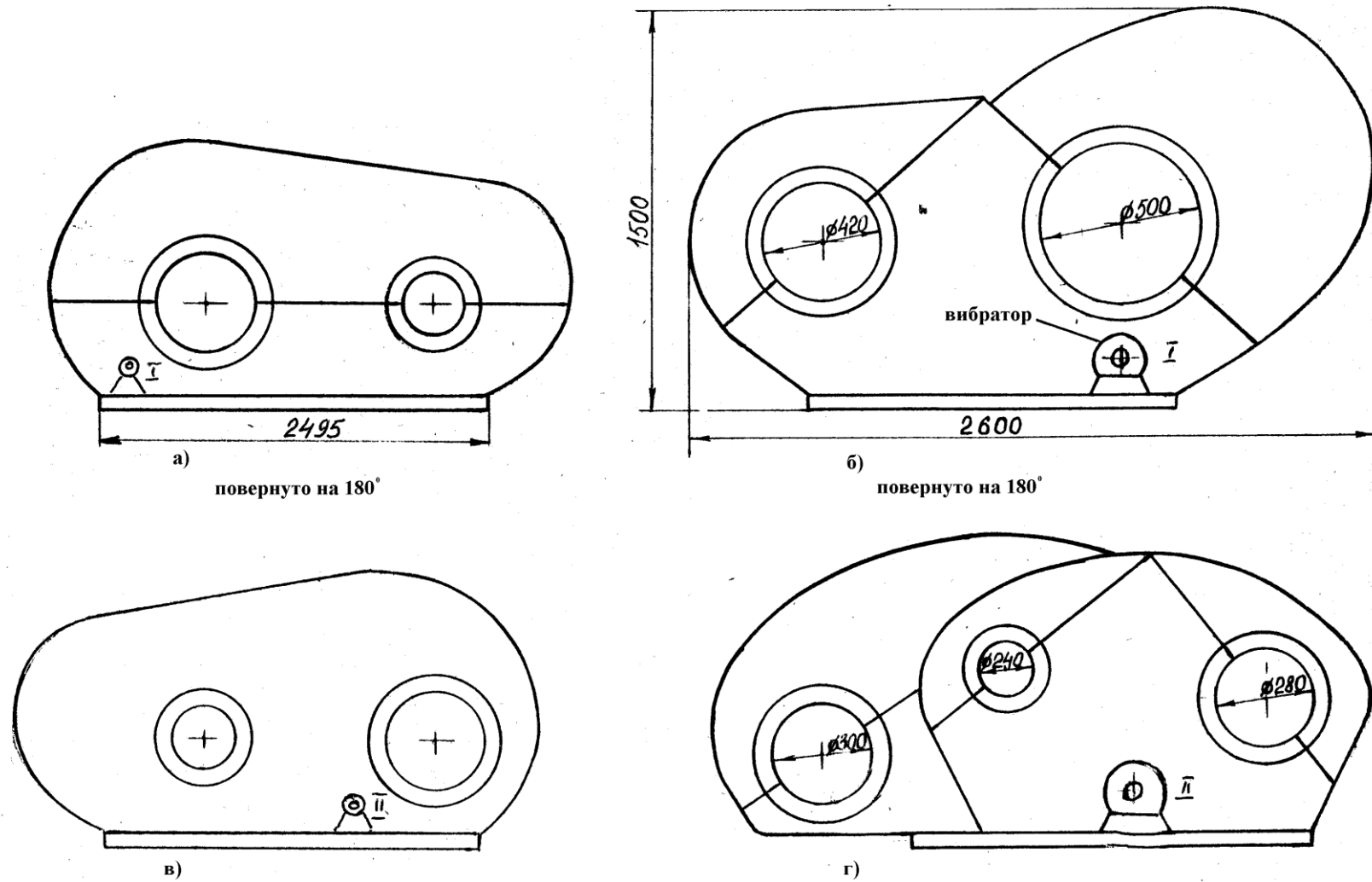


Рисунок 5.15. Схема расположения вибратора на редукторах в сборе

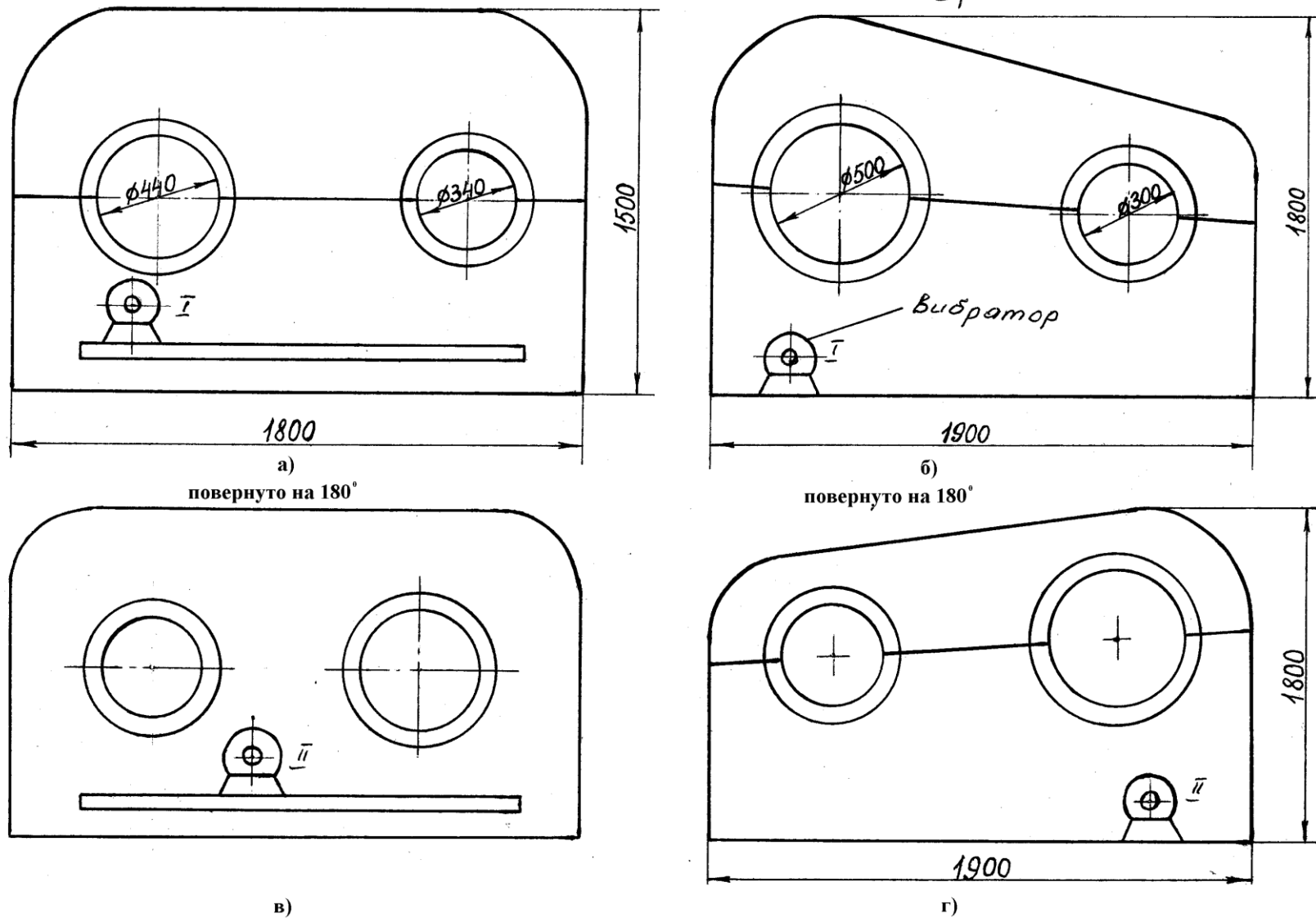


Рисунок 5.16. Схема расположения вибратора на редукторах в сборе

Таблица 5.6.

Результаты измерения напряжений на деталях редукторов

№ участка	№ точки	До виброобработки				После виброобработки			
		μ_2	μ_1	$\Delta\mu$	σ , МПа	μ_2	μ_1	$\Delta\mu$	σ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Крышка черт.407191057									
I	1	+45	-120	-165	-175	+48	-120	-168	-178
	2	+65	-120	-185	-220	+72	-120	-192	-240
	3	+37	-120	-157	-167	+45	-120	-165	-175
	4	-65	- 31	+ 34	+ 32	-60	-30	+30	+28
	5	-105	+25"	+130	+120	-90	+30	+120	+110
2	1	-107	36	+143	+146	-101	+26	+127	+118
	2	-120	71	+191	+220	-120	+69	+189	+200
	3	-120	+64	+184	+194	-120	+52	+172	+184
	4	-120	+65	+185	+195	-120	+55	+175	+185
	5	+40	-3	-151	-160	31	-100	-131	-140
3	1	-67	-120	-53	-42	- 63	-120	-57	-44
	2	-30	-4	+26	+24	-30	-30	0	0
	3	-115	+37	+152	-160	-109	39	+148	+158
	4	-120	+43	+163	+173	-120	40	+160	+170
	5	- 24	-64	-40	-38	-15	-58	43	-40
Корпус чертеж 407191041 №1									
1	1	0	-95	-95	-94	+7	-102	-109	-100
	2	-75	-20	+55	+53	-62	-21	+41	+38-
	3	-67	-10	+57	+55	-70	-16	+54	+52
	4	-98	+19	+117	+117	-88	+6	+94	+ 92
	5	-86	-12	+74	+70	-55	-15	+40	+ 38
2	1	-44	-70	-26	-24	-26	-67	-41	-38
	2	-67	-27	+40	+38	-66	-30	+36	+34
	3	-5	-88	-83	-80	-17	-94	-77	-74
	4	+2	-96	-98	-96	-9	-94	-85	- 83
	5	+24	-130	-134	-130	25	-99	-124	-120

Таблица 5.6 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1	-20	-97	-77	-70	-10	-84	-74	-68
	2	+16	-120	-136	-132	27	-118	-145	-140
	3	- 8	-89	-81	-78	-7	-86	-79	-75
	4	-94	+4	+98	+94	-90	0	+90	+86
	5	-13	- 62	+49	+11	- 6	-76	-70	-66
Корпус черт. 407191041 №2									
1	1	32	-120	-152	-160	41	-120	-161	-170
	2	-98	28	+126	+130	-95	23	+118	+118
	3	-78	25	+103	+100	-82	+17	+99	+ 96
	4	-74	-6	+68.	-64	-72	-13	+59	+54
	5	10	-32	42	-40	15	-41	-56	-50
2	1	23	-95	-118	-118	15	-107	-122	-124
	2	-46	-31	+15	+13	-47	-35	+12	+10
	3	4	-97	-101	-98	3	-99	-102	-97
	4	-62	-13	+49	+47	-76	-34	+42	+40
	5	21	-64	-85	- 83	22	- 63	-85	- 83
3	1	56	-120	-176	-178	53	-120	-173	-175
	2	48	-120	-168	-122	45	-120	-165	-170
	3	25	-107	-132	-133	28	-113	-141	-145
	4	-67	-10	+ 97	+55	-66	-15	+51	+48
	5	-26	-40	-14	-12	-16	-33	-17	-15

После вибрационной обработки величина максимальных растягивающих напряжений снизилась до 200 МПа, т.е. на 9%. В среднем наблюдается снижение растягивающих напряжений на 15%.

5.5. Изучение напряжений на ригеле бурового оборудования

Работы осуществлялись на ПО «Уралмаш». Ригель представляет собой сварную металлоконструкцию коробчатого сечения размером

21000x1000x1000мм изготовленную из проката стали 10ХСНД толщиной 20-40мм, массой 20420кг по чертежу 14025.77.202 , заказ 160248. Общий вид ригеля показан на фотографии рис. 5.17-5.18. Для изучения напряженного состояния было намечено девять участков I-IX в различных сечениях по длине изделия. Измерение напряжений производили до и после вибрационной обработки прибором ИОН-4М. Виброобработку осуществляли вибратором DV3 - 6-1/7R.



Рис. 5.17. Общий вид сварного изделия подготовленного для виброобработки

Учитывая большие габариты изделия, виброобработку производили в 4 -е этапа с расположением вибратора в различных участках изделия (рис. 5.19) Режим вибрационной обработки каждого участка ригеля приведен ниже, в табл. 5.7.

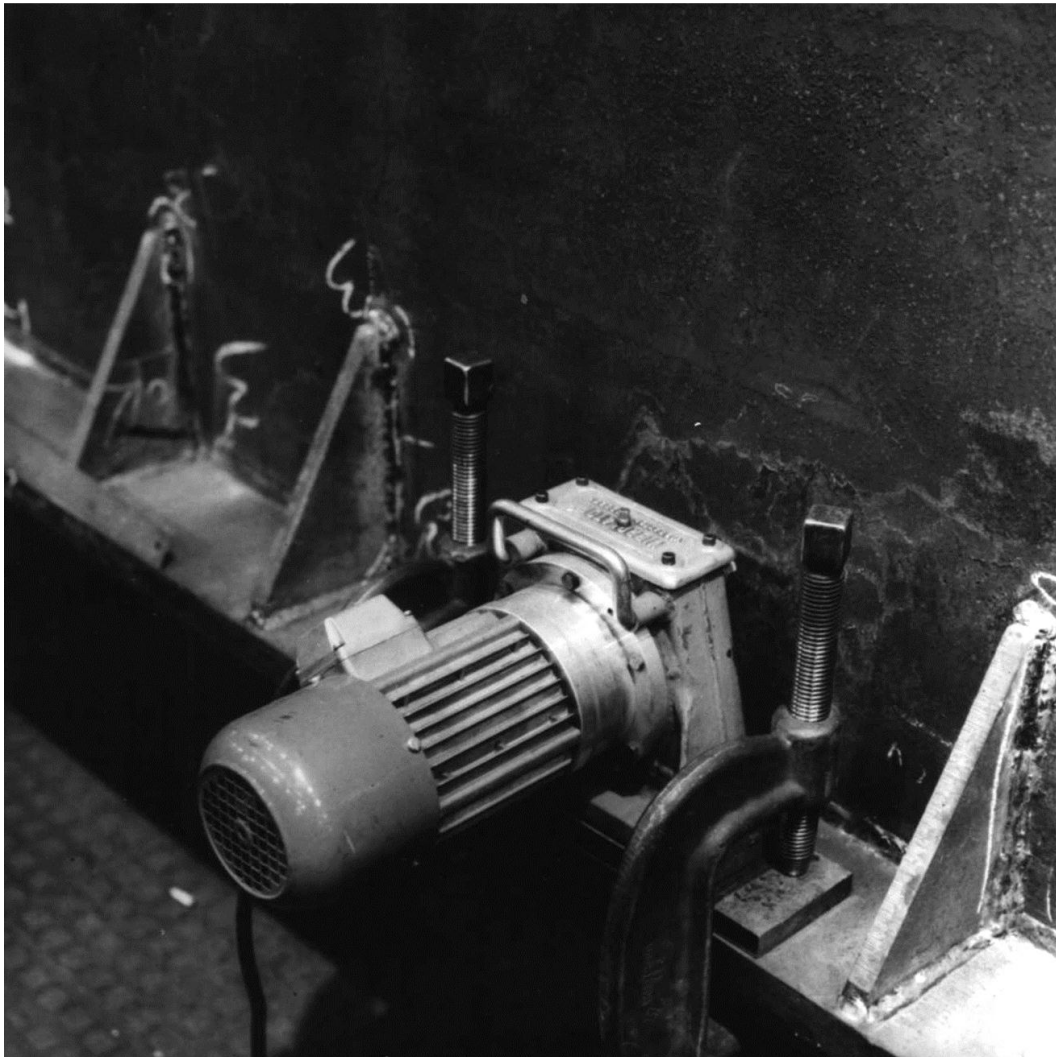


Рис. 5.18. Общий вид крепления вибратора на ригеле бурового оборудования.

Таблица 5.7.

Режимы вибрационной обработки ригеля

Наименование	$n_{рез.}$, об/мин	I_H, A	I_K, A	t, мин
1	2	3	4	5
1	4400	6,7	5,6	15
	3500	4,6	4,5	5
	3000	4,25	4,25	5
2	4400	6,05	5,6	10
	3500	4,45	4,25	5
	3000	4,25	4,25	5

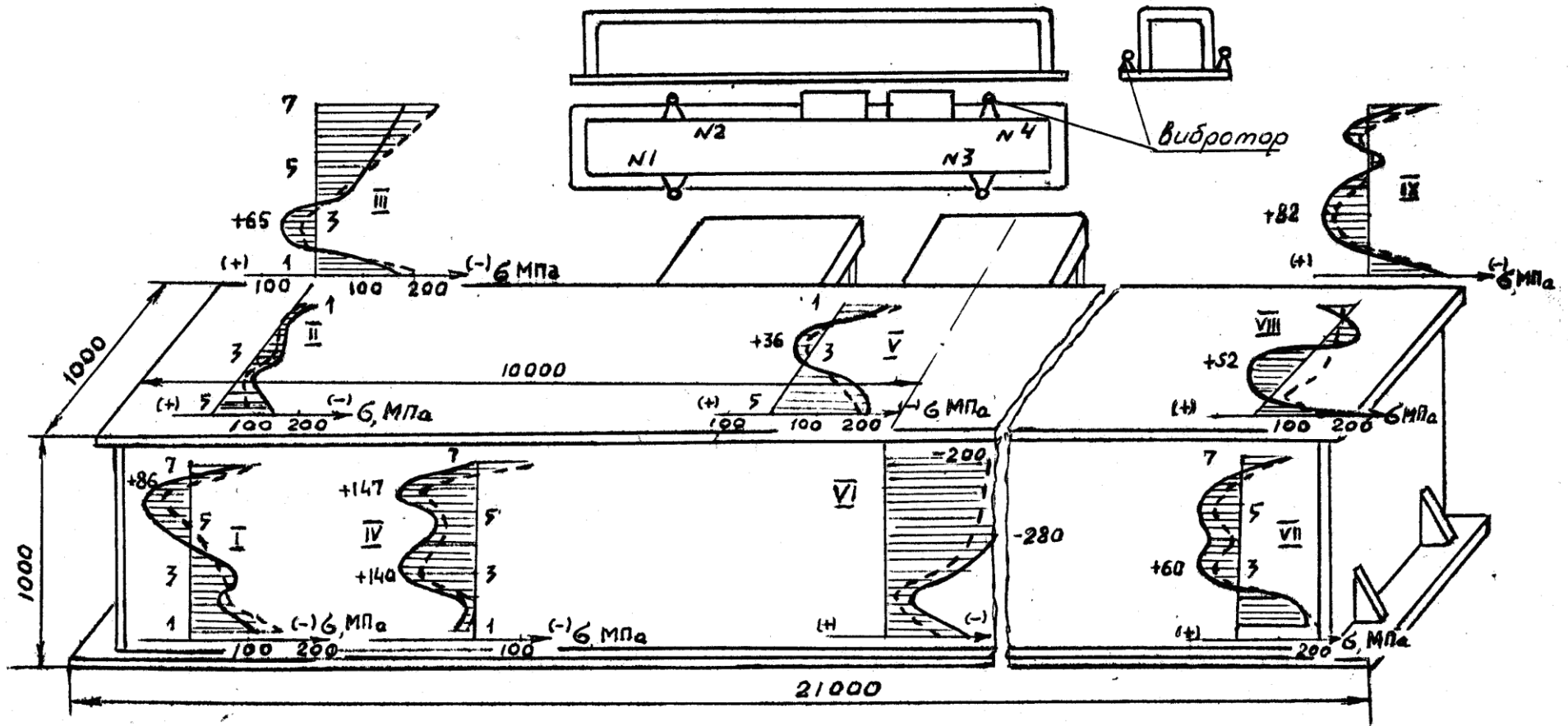


Рис. 5.19. Схема расположения участков для измерений и эпюры остаточных напряжений на ригеле

Таблица 5.7 (продолжение)

1	2	3	4	5
3	4400	4,0	3,6	10
	3500	4,8	4,75	5
	3000	4,35	4,35	5
4	4400	6,05	5,6	10
	3500	4,5	4,5	5
	3000	4,2	4,2	5

Результаты измерения напряжений до виброобработки, а также после всего цикла ее приведены в табл.5.8.

Таблица 5.8.

Результаты измерения напряжений на ригеле

№ участка	№ точки	До виброобработки				После виброобработки			
		μ_2	μ_1	$\Delta\mu$	σ , МПа	μ_2	μ_1	$\Delta\mu$	σ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	1	27	-94	-121	-118	28	-105	-133	-138
	2	-14	-59	-45	-43	-7	-61	-54	-53
	3	-9	72	-81	-79	7	-64	-71	-70
	4	-29	-35	-6	-3,0	-25	-38	-13	-12
	5	-54	-20	+34	+30	-38	-27	+11	+10
	6	-52	+36	+88	+86	-39	7	+46	+45
	7	45	-115	-160	-170	48	-112	-160	-170
II	I	-31	-48	-17	-45	-31	-45	-14	-14
	2	-28	-39	-11	-10	-34	-45	-II	-10
	3	4	-63	-67	-66	15	-75	-60	-58
	4	-9	-55	-46	-43	-22	-70	-48	-45
	5	42	-100	-142	-147	40	-118	-158	-167
III	1	.43	-115	-158	-160	30	-93	-123	-119
	2	-56	-28	+28.	+26	-50	-30	+20	+18
	3	-58	7	+65	+63	-41	-15	+26	+24
	4	6	-73	-79	-77	-7	-70	-63	-60

Таблица 5.8 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
III	5	4	-74	-78	-76	8	-75	-84	-80
	6	22	-100	-122	-116	36 -	-100	-136	-130
	7	64	-130	-194	-196	77	-130	-207	-280
IV	1	-43	-15	+28	+24	-32	-16	+16	+14
	2	-30	-18	+12	+10	-37	-32	+5	+3
	3	-110	36	+146	+140	-100	18	+118	+114
	4	-98	17	+115	+113	-99	2	+101	+98
	5	-96	0	+96	+94	-90	-20	+70'	+65
	6	-110	35	+145	+147	-98	34	+122	+118
	7	-43	-45	-2	-2	-33	-54	-21	-183
V	1	12	-92	-104	-100	13	-90	-103	-102
	2	-69	-27	+38	+36	-45	-25	+20	+18
	3	-54	-27	+27	+25	-42	-31	+11	+10
	4	40	-120	-160	-170	35	-115	-150	-157
	5	47	-130	-177	-177	48	-122	-170	-175
VI	I	40	-94	-134	-130	25	-92	-117	-110
	2	-30	-35	-5	-40	-34	-38	-4	-2,0
	3	70	-130	-200	-280	-56	-130	-196	-190
	4	75	-130	-205	-280	70	-130	-200	-280
	5	73	-130	-203	-280	68	-130	-198	-200
	6	73	-130	-203	-280	66	-130	-196	-198
	7	60	-130	-190	-220	56	130	-186	-182
VII	1	36	-120	-156	-160	48	-130	-178	-179
	2	17	-100	117	-114	11	-103	-114	-110
	3	-63	0	+63	+60	-58	-7	+51	+49
	4	-47	-32	+15	+14	-42	-36	+6	+6
	5	-80	-20	+60	+58	65	-22	+43	+40
	6	-44	-21	+23	+21	-50	-32	+18	+16
	7	40	-118	-148	-155	34	-115	-149	-157

Таблица 5.8 (продолжение2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VIII	1	-62	-12	+50	+48	+65	-45	+20	+18
	2	-10	-61	-51	-49	-34	-49	-15	-13
	3	-67	-14	+53	+52	-23	-55	-32	-30
	4	-54	-30	+24	+23	-38	-43	-15	-13
	5	62	-130	-190	-230	38	-120	-158	-168
IX	1	49	-120	-169	-178	41	-125	-166	-175
	2	-76	0	+76	+73	-77	-17	+60	+58
	3	-81	4	+85	+82	-82	-5	+77	+75
	4	-64	-19	+45	+43	-67	-27	+40	+38
	5	-26	253	-27	-24,0	-32	-50	-18	-16
	6	-62	-12	+50	+48	-65	-20	+45	+43
	7	21	-106	-85	-83	26	-113	-139	-140

Результаты, приведенные в таблице показывают, что в ригеле после сварки образуются остаточные напряжения растяжения и сжатия. Максимальная величина растягивающих напряжений составляет 147 МПа (участок IV т.6), а сжимающих - 280 МПа (участок VI т.3-6). После вибрационной обработки величина растягивающих максимальных напряжений уменьшилась до 114 МПа, т.е. на №18%, а сжимающих до 180-200 МПа. Однако следует отметить, что на некоторых участках произошло увеличение сжимающих остаточных напряжений.

РАЗДЕЛ 6.**ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ
КОНСТРУКЦИЙ С КОНТРОЛЕМ ПО КОСВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ**

Как показали исследования, проведенные разными авторами [41–55], процесс снижения величины остаточных напряжений сопровождается падением тока потребляемого электродвигателем. В связи с этим, при внедрении технологии вибрационного старения, на ряде заводов рекомендовалось производить контроль процесса по данному косвенному признаку. Некоторые из работ в данном направлении представлены в данном разделе

6.1. Конструкции типа «большой» и «малый» балансиры

В качестве проверки эффективности снижения остаточных напряжений вибрационной обработкой на «Зугресский энергомеханический завод» была проведена виброобработка сварных конструкций «Большой балансир со взвешиванием» чертереж 1zр958263 заводской №2 и «Малый балансир» чертереж 1zр958256 заводской №12.

Для проведения процесса обработки конструкции были установлен на виброизолирующие опоры (автомобильные покрышки), которые были расположены таким образом, чтобы обеспечить максимальную гибкость конструкции.

Проведение вибрационной обработки «Большого балансира».

При проведении виброобработки для данной конструкции наиболее эффективно проводить обработку в два этапа, закрепляя вибратор при помощи струбцин последовательно на каждой из сторон (рис. 6.2).



Рис. 6.1. Большой балансир после установки на опоры

Сторона А

Перед обработкой и после нее был замерен ток потребляемый электродвигателем (дебаланс вибровозбудителя был установлен на 5%). Результаты представлены в виде таблицы 6.1. и графика на рис. 6.3.



Рис. 6.2. Закрепление вибратора на конструкции

Таблица 6.1.

Потребляемый ток	Частота, об/мин											
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7800	8000	8200	8700	9000
До обработки, А	8,5	9	10	10,5	11	12	14	16	16	17	18	20
После обработки, А	6,5	7	7,5	8	9	10	10,5	15	13	14	16,5	16

Виброобработка проводилась последовательно на первых трех резонансных частотах при положении резонанса 20%, что соответствует вибрационной нагрузке ~ 6 кН. Время виброобработки на каждой из частот – 5 минут. Замеренные резонансные характеристики представлены в таблице 6.2.

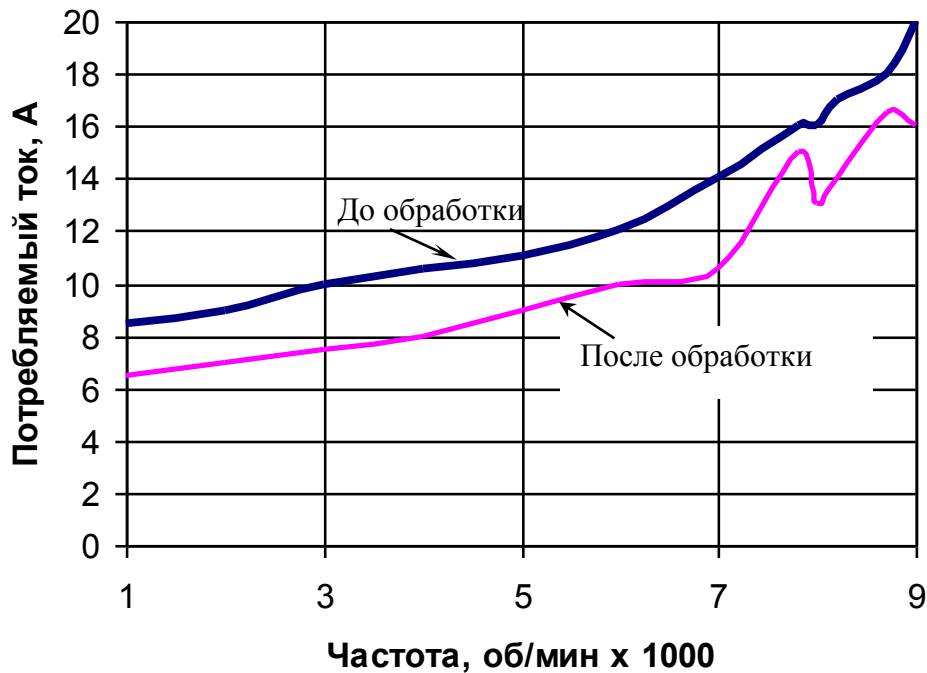


Рис.3. Зависимость потребляемого тока от частоты вращения

Таблица 6.2.

	I резонансная частота		II резонансная частота		III резонансная частота	
	До обработки	После обработки	До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
Частота, об/мин	7800	7600	8200	8100	9000	9000
Потребляемый ток, А	16,5	15	17,5	16,5	19	17

Как видно, после виброобработки произошло снижение потребляемого электродвигателем тока и частоты собственного резонанса детали, что свидетельствует о снижении остаточных напряжений.

Сторона Б

После обработки стороны А конструкция была развернута на опорах и вибратор был переставлен симметрично на другую сторону конструкции.

Перед обработкой и после нее был замерен ток потребляемый электродвигателем (дебаланс вибровозбудителя был установлен на 5%). Результаты представлены в виде таблицы 6.3. и графика на рис. 6.4. Следует отметить, что конструкция уже была обработана при первой установке вибратора, поэтому токи, потребляемые двигателем, и резонансные частоты здесь изначально ниже, соответственно и снижение при второй обработке будет относительно ниже.

Таблица 6.3.

Потребляемый ток	Частота, об/мин									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7600	8000	9000
До виброобработки, А	7	8	8	9	10	11	12	13,5	14	16
После виброобработки, А	7	8	8	8,5	9,5	10	11,5	12,5	13	15

Кроме того отмечено, что при обработке на стороне Б не наблюдается вторая резонансная частота равная 8200 об/мин. Это, очевидно, связано с тем, что данная частота является локальной и возникла из-за внутреннего дефекта материала или сварного шва (данный факт требует дополнительной проверки на других конструкциях выполненных по чертежу 1zр958263)

Виброобработка проводилась последовательно на первых двух резонансных частотах при положении резонанса 20%, что соответствует вибрационной нагрузке ~ 6 кН. Время виброобработки на первой частоте – 10 минут, на второй -5. Замеренные резонансные характеристики представлены в таблице 6.4.

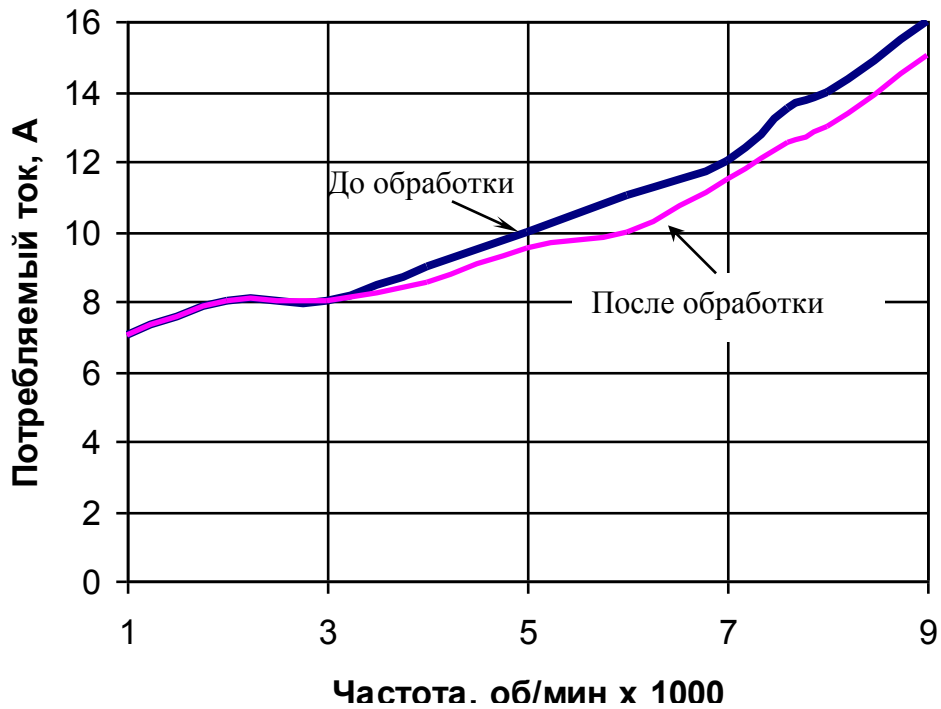


Рис. 6.4. Зависимость потребляемого тока от частоты вращения

Таблица 6.4.

	I резонансная частота		II резонансная частота	
	До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
Резонансная частота, об/мин	7600	7500	9000	9000
Потребляемый ток, А	16	14,5	17,5	17

Как видно, после виброобработки произошло снижение потребляемого электродвигателем тока и частоты собственного резонанса детали, что свидетельствует о снижении остаточных напряжений.

Проведение вибрационной обработки «Малого балансира».

В связи с тем что конструкция имеет крестовидную форму, то при проведении виброобработки опоры были расположены под каждой из консолей, а вибратор закреплен в геометрическом центре конструкции (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Балансир с закрепленным вибратором

Для закрепления вибратора была подварена специальная крепежная площадка (рис. 6.6).



Рис. 6.6. – Крепление вибратора к конструкции

Перед обработкой и после нее был замерен ток потребляемый электродвигателем (дебаланс вибровозбудителя был установлен на 5%).

Виброобработка проводилась последовательно на в течении 10 минут на первой резонансной частоте при положении резонанса 40%, 5 минут на второй при 60% и 5 минут при 100%. (При промышленном использовании достаточно будет обработки на первых двух резонансных частотах по 5 минут при дебалансе 100%).

Результаты измерений представлены в виде таблицы 6.5 и графика на рис. 6.7.

Таблица 6.5.

Потребляемый ток	Частота, об/мин ×1000											
	1	2	3	4	5	6	7	7,3	8	8,65	9	9,5
До обработки, А	7	7,5	8,5	9	9,5	10,5	11,5	12	13	14,5	15	16
После обработки, А	6	6,5	7	8	8,5	9,5	10	10	12	13	14,5	15,5

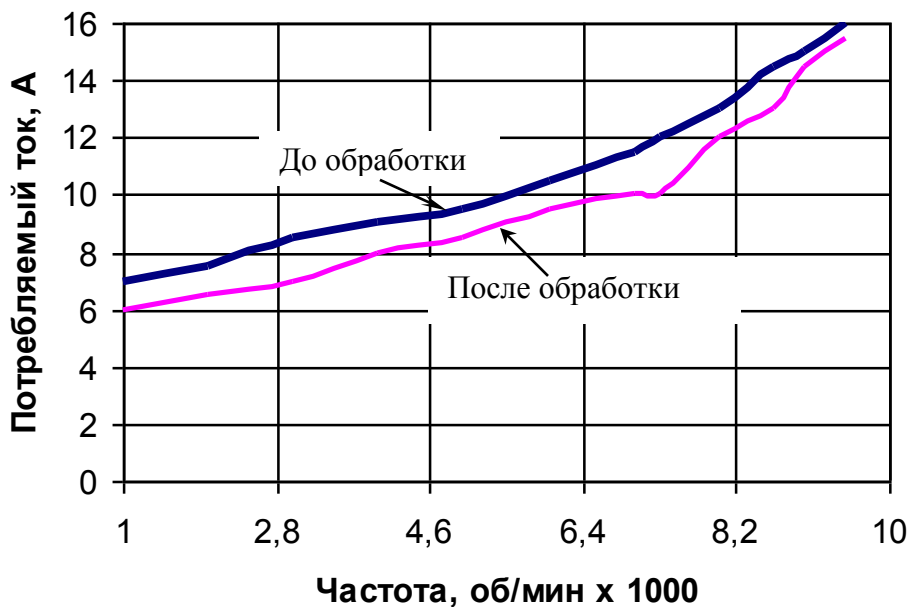


Рис. 6.7.

Как видно, после виброобработки произошло снижение потребляемого электродвигателем тока, что косвенным образом свидетельствует о снижении остаточных напряжений.

6.2. Замена термической обработки узлов МВ-1500-00.02.000 «Балка моста» вибрационной обработкой

Данные работы были проведены на ООО «КЗ «Ростсельмаш».

Порядок выполнения работ определен следующий:

- сканирование нагрузочных характеристик балок моста после выполнения сварочных работ (две балки);
- вибрационная обработка балок моста (две балки);
- сканирование нагрузочных характеристик балок моста после выполнения вибрационной обработки (две балки);
- сканирование нагрузочных характеристик балок моста после сварки и термической обработки (две балки).

Кроме того, по требованию главного сварщика ООО «КЗ «Ростсельмаш», две балки моста, прошедшие вибростабилизирующую обработку, были отправлены на термическую обработку, после которой также было выполнено сканирование нагрузочных характеристик.

Проведение вибрационной обработки.

До начала работ предоставленные Заказчиком балки были замаркированы следующим образом:

- балки №1 и №2 – балки после сварки для выполнения вибрационной обработки;
- балки №3 и №4 – балки после термической обработки.

Вибрационная обработка балок моста проводилась с использованием крана (рис 6.8). Каждая балка подвешивалась на цепях в горизонтальном положении. Виброблок посредством двух струбцин крепился в средней части балки под углом примерно 30 градусов относительно продольной оси балки. На кронштейне устанавливался пьезоэлектрический преобразователь – вибродатчик ДН-3.

Выявление резонансных частот выполнялось одновременно со сканированием нагрузочных характеристик. При этом был установлен дисбаланс виброблока 5%.

Повышая последовательно обороты виброблока до 8000 об/мин, и контролируя величину потребляемого тока и вибрации по соответствующим указателям, производилось сканирование нагрузочных характеристик каждой балки.

Вибрационная обработка мостов производилась при установленном дисбалансе виброблока 40% следующим образом:

- виброблок плавно разгонялся до 8000 об/мин (~130 Гц);
- частота вращения последовательно снижалась до заранее отмеченных точек резонанса;
- в каждой точке резонанса выполнялась виброобработка в режиме девиации в течение 3-4 минут.

Сканирование нагрузочных характеристик после виброобработки и термической обработки проводилось при тех же условиях, что и до обработки. Дисбаланс виброблока устанавливался 5% и при плавном повышении оборотов до 8000 об/мин проводился контроль величины потребляемого тока.



Рис 6.8 Изделие «Балка моста» с закрепленным виброблоком

Результаты выполненных работ.

В процессе сканирования нагрузочных характеристик балок подтверждено, что у балок, как деталей, имеющих однотипную конструкцию, величины потребляемого виброблоком тока при одинаковых оборотах двигателя виброблока, мало отличаются между собой. Аналогично мало отличаются между собой и точки резонанса в этих

деталей. Величины резонансных частот (точки резонанса) деталей балка моста представлены в таблице 6.6.

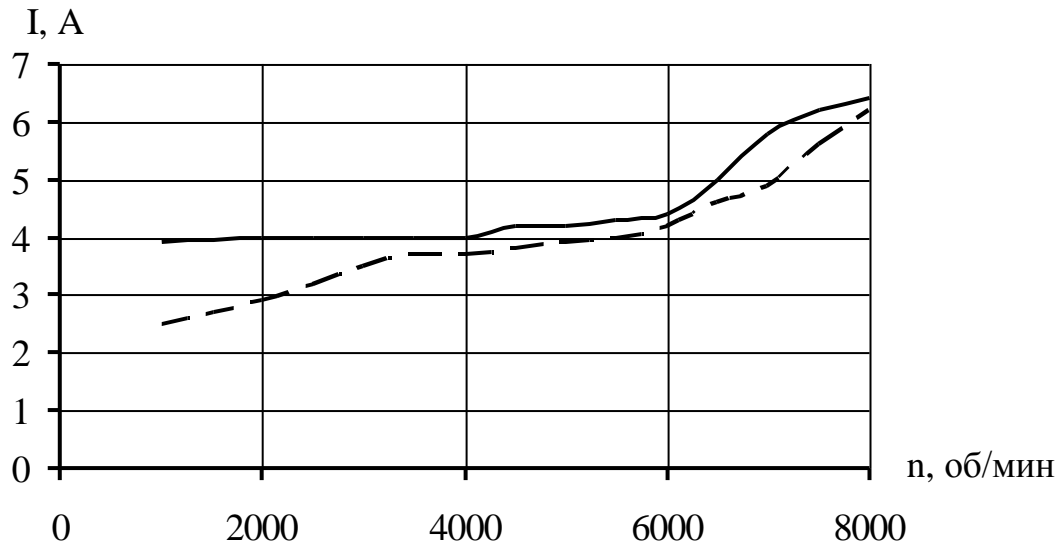
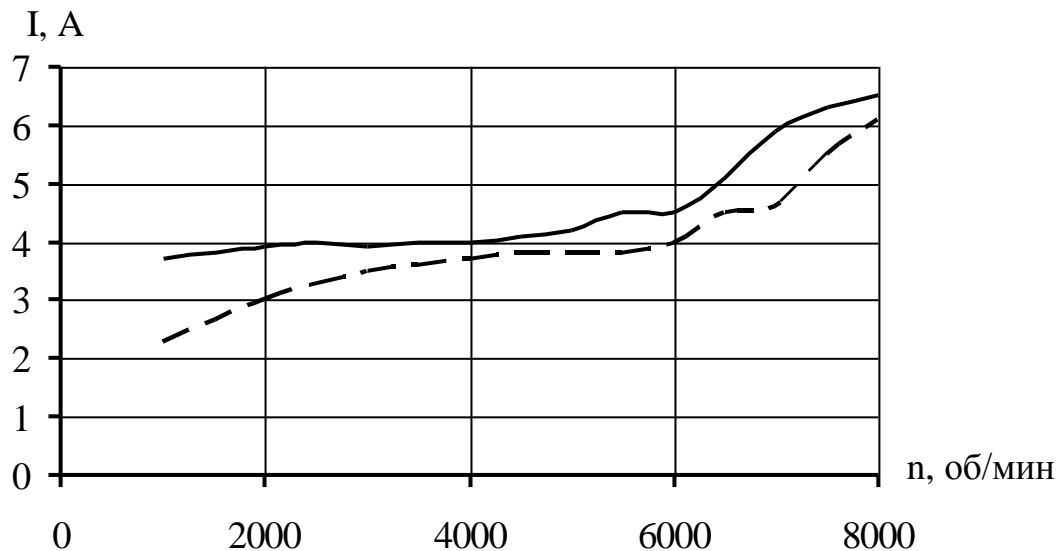
Результаты сканирования нагрузочных характеристик деталей №1 и №2 до и после виброобработки представлены в таблице 6.7. и на графиках рис. 6.9 (балка №1) и рис.6.10 (балка №2), где сплошной линией показаны значения тока до обработки, а штриховой линией - после.

Таблица 6.6

№п/п	п, об/мин
1	1700
2	2700
3	4100
4	5200
5	6400
6	7500

Таблица 6.7

п, об/мин	Балка №1		Балка №2	
	I _H ,А	I _K ,А	I _H ,А	I _K ,А
1000	3,9	2,5	3,7	2,3
2000	4,0	2,9	3,9	3,0
2500	4,0	3,2	4,0	3,3
3000	4,0	3,5	3,9	3,5
3500	4,0	3,7	4,0	3,6
4000	4,0	3,7	4,0	3,7
4500	4,2	3,8	4,1	3,8
5000	4,2	3,9	4,2	3,8
5500	4,3	4,0	4,5	3,8
6000	4,4	4,2	4,5	4,0
6500	5,0	4,6	5,1	4,5
7000	5,8	4,9	5,9	4,6
7500	6,2	5,6	6,3	5,5
8000	6,4	6,2	6,5	6,1

Рис. 6.9. График зависимости тока от n для балки 1Рис. 6.10. График зависимости тока от n для балки 2

Результаты сканирования нагрузочных характеристик деталей №3 и №4, выполненные после термической обработки балок моста представлены в таблице 6.8.

Следует отметить, что полное сканирование балки №3 выполнить не удалось по следующей причине – попутно со сканированием было обнаружен дефект в сварных швах балки.

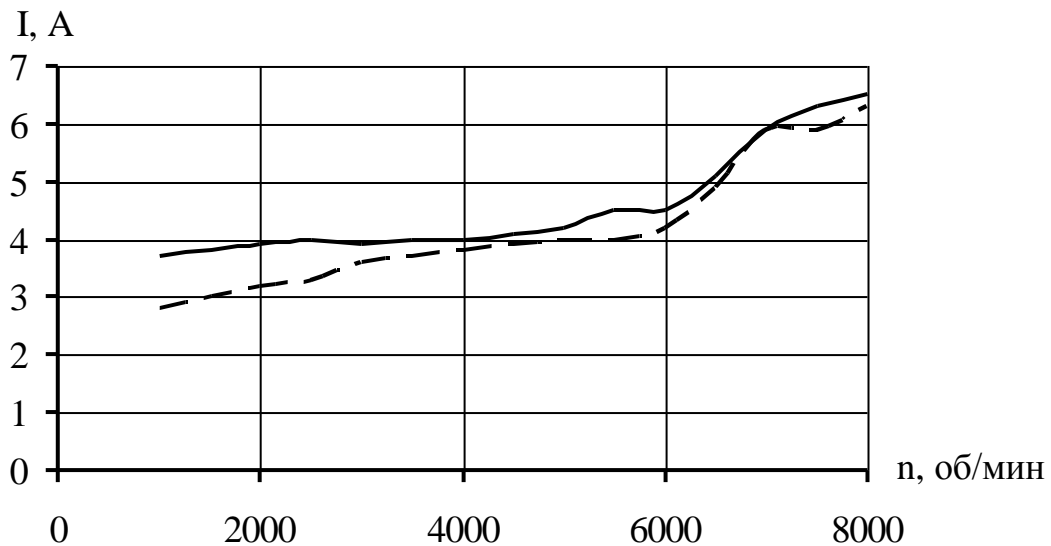
Наличие дефекта (непровара швов) выразилось в виде резкого повышения уровня шума при превышении скорости двигателя виброблока свыше 4500 об/мин, который продолжал возрастать с дальнейшим

повышением скорости. В целях недопущения разрушения швов, имеющих дефект в виде непровара, было решено не выполнять разгон двигателя до скорости свыше 6500 об/мин.

Таблица 6.8

n, об/мин	Потребляемый ток после термической обработки, А	
	Балка №3	Балка №4
1000	2,4	2,8
2000	2,9	3,2
2500	3,1	3,3
3000	3,2	3,6
3500	3,8	3,7
4000	3,9	3,8
4500	4,0	3,9
5000	4,3	4,0
5500	5,6	4,0
6000	6,2	4,2
6500	6,9	4,9
7000	-	5,9
7500	-	5,9
8000	-	6,3

Результаты сравнения результатов сканирования нагрузочных характеристик балки №1, прошедшей вибростабилизирующую обработку, (сплошная линия) и балки №4, прошедшей термическую обработку, (штриховая линия) представлены на графике рис 6.11.

Рис. 6.11. График зависимости тока от n для балок 1 и 4

Как отмечалось выше балки № 1 и № 2 после вибрационной обработки были направлены на термическую обработку, после которой повторно выполнялось сканирование нагрузочных характеристик. Результаты сканирования балок моста, прошедших термическую обработку после вибрационной обработки, представлены в таблице 6.9.

Таблица 6.9

n, об/мин	Потребляемый ток после термической обработки, А	
	Балка №1	Балка №2
1000	3,8	3,4
2000	4,2	4,0
2500	4,4	4,2
3000	4,3	4,3
3500	4,6	4,4
4000	4,9	4,5
4500	5,0	4,9
5000	5,5	5,0
5500	5,8	5,5
6000	6,0	5,9

Таблица 6.9.(продолжение)

6500	6,5	6,2
7000	6,9	6,8
7500	8,1	7,8
8000	9,0	8,9

Анализ результатов выполненных работ.

Сканирование нагрузочных характеристик балок моста №1 и №2 до и после вибрационной обработки показывает эффективность такого вида обработки с целью снятия внутренних напряжений, что подтверждается снижением виброблоком потребляемого тока до и после вибрационной обработки. Величина падения токов после обработки моста №1 представлена в таблице 6.10 и на рис. 6.9, а моста №2 – в таблице 6.11 и на рис. 6.10.

Таблица 6.10.

n, об/мин	Потребляемый ток		Падение тока	
	I _н , А	I _к , А	Δ I, А	Δ I, %
1000	3,9	2,5	1,4	35,9
2000	4,0	2,9	1,1	27,5
2500	4,0	3,2	0,8	20,0
3000	4,0	3,5	0,5	12,5
3500	4,0	3,7	0,3	7,5
4000	4,0	3,7	0,3	7,5
4500	4,2	3,8	0,4	9,5
5000	4,2	3,9	0,3	7,1
5500	4,3	4,0	0,3	7,0
6000	4,4	4,2	0,2	4,5
6500	5,0	4,6	0,4	8,0
7000	5,8	4,9	0,9	15,5
7500	6,2	5,6	0,6	9,7
8000	6,4	6,2	0,2	3,1

Отмеченное в ходе сканирования падение потребляемого виброблоком тока свидетельствует о снижении внутренних напряжений после вибрационной обработки. При этом следует напомнить, что метод контроля эффективности вибрационной обработки по падению потребляемого виброблоком тока является косвенным и указывает на факт снижения остаточных напряжений в обработанной детали и не может быть использован для определения самой величины этих напряжений.

Вместе с тем, анализ сканирования балок №3 и №4 после термической обработки свидетельствует о недостаточной эффективности этого вида обработки по сравнению с выполненной вибростабилизацией. Это подтверждается более интенсивным снижением потребляемого тока в деталях, прошедших вибростабилизирующую обработку. Сравнительные результаты эффективности вибрационной и термической обработки представлены в таблице 6.12 и на графике рис.6.11.

Таблица 6.11

Число оборотов n , об/мин	Потребляемый ток		Падение тока	
	I_n , А	I_k , А	ΔI , А	ΔI , %
1000	3,7	2,3	1,4	37,8
2000	3,9	3,0	0,9	23,1
2500	4,0	3,3	0,7	17,5
3000	3,9	3,5	0,4	10,3
3500	4,0	3,6	0,4	10,0
4000	4,0	3,7	0,3	7,5
4500	4,1	3,8	0,3	7,3
5000	4,2	3,8	0,4	9,5
5500	4,5	3,8	0,7	15,6
6000	4,5	4,0	0,5	11,1
6500	5,1	4,5	0,6	11,8
7000	5,9	4,6	1,3	22,0
7500	6,3	5,5	0,8	12,7
8000	6,5	6,1	0,4	6,2

Таблица 6.12

Скорость виброблока, об/мин	Потребляемый ток после виброобработки, А		Потребляемый ток после термообработки, А	
	Балка №1	Балка №2	Балка №3	Балка №4
1000	2,5	2,3	2,4	2,8
2000	2,9	3,0	2,9	3,2
2500	3,2	3,3	3,1	3,3
3000	3,5	3,5	3,2	3,6
3500	3,7	3,6	3,8	3,7
4000	3,7	3,7	3,9	3,8
4500	3,8	3,8	4,0	3,9
5000	3,9	3,8	4,3	4,0
5500	4,0	3,8	5,6	4,0
6000	4,2	4,0	6,2	4,2
6500	4,6	4,5	6,9	4,9
7000	4,9	4,6	-	5,9
7500	5,6	5,5	-	5,9
8000	6,2	6,1	-	6,3

Следует отметить, что выявленная в результате выполненной работы более высокая эффективность вибрационной обработки по сравнению с термической обработкой деталей, в целом не является закономерной. По нашему мнению, полученные результаты свидетельствуют о низкой технологичности детали балка моста с точки зрения термической обработки. Возможно, это связано с различной скоростью нагрева и охлаждения кронштейнов балок относительно лонжерона и фланцев, вследствие чего возникают дополнительные термические напряжения в местах стыков этих деталей.

РАЗДЕЛ 7.**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ
НА КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛИТЕЙНО-СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ**

При изучении влияния процесса вибрационной обработки на снижение остаточных напряжений в машиностроительных конструкциях с объемным напряженным состоянием, в качестве объекта исследования была выбрана крышка редуктора производства АО «НКМЗ». Крышка представляет собой составную конструкцию с литым основанием и тонкостенной сварной частью (рис 7.1. – 7.2). Толщина стенок крышки 10 мм.

Виброобработка проводилась с одной перестановкой вибратора на первых трех резонансных частотах при первом закреплении (рис. 7.3.а) и двух резонансных частотах при втором варианте закреплении (рис. 3.б). При проведении виброобработки крышка для снижения общей жесткости и в целях виброизоляции была установлена на автомобильные покрышки, расположенные по углам конструкции.

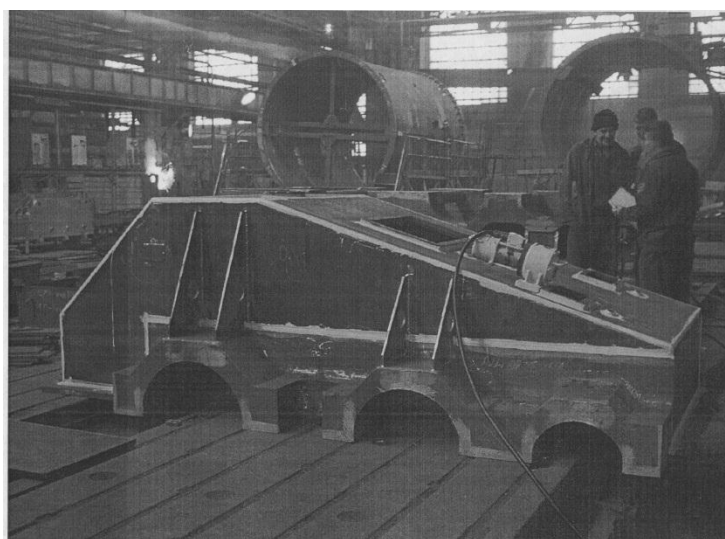


Рис. 7.1. Общий вид крышки редуктора

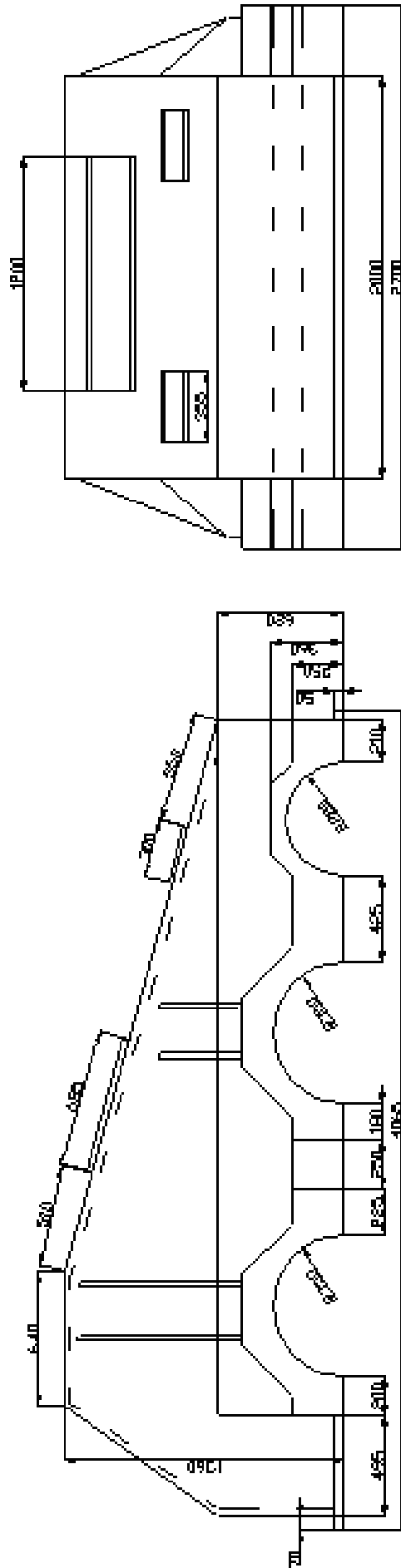
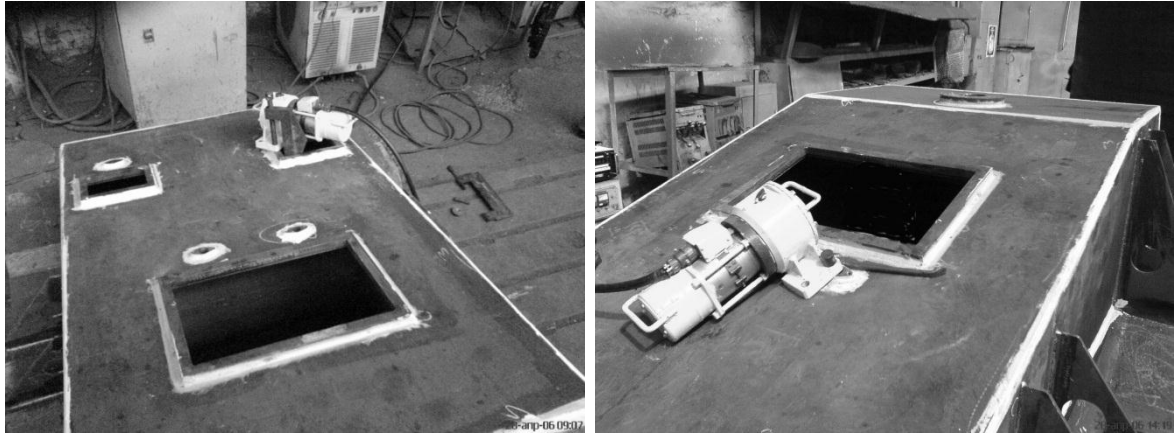


Рис. 7.2. Чертеж крышки редуктора



а

б

Рис. 7.3. Закрепление виброблока на конструкции.

Время прекращения виброобработки выбиралось по стабилизации тока потребляемого двигателем виброблока, в среднем это составило 25 мин на каждой из частот. Значение потребляемого тока двигателя, на каждой из частот, до и после виброобработки приведены в таблице 7.1.

После виброобработки проводилась термообработка этой же конструкции.

Для контроля качества вибро и термообработок использовался метод магнитной индукции. Коэрцитивная сила измерялась структуроскопом КРМ-Ц-К2М после сварки и после каждого вида обработки. Полученные значения представлены в виде таблицы 7.2, где точки измерений изображены на рис.7. 4.

Таблица 7.1

Потребляемый ток двигателя, А

Частота вращения двигателя, об/мин		До виброобработки	После виброобработки
Первая установка вибратора	4588	16	8
	5660	20	9
	6860	29	19
Вторая установка вибратора	3200	18	9
	3800	40	12

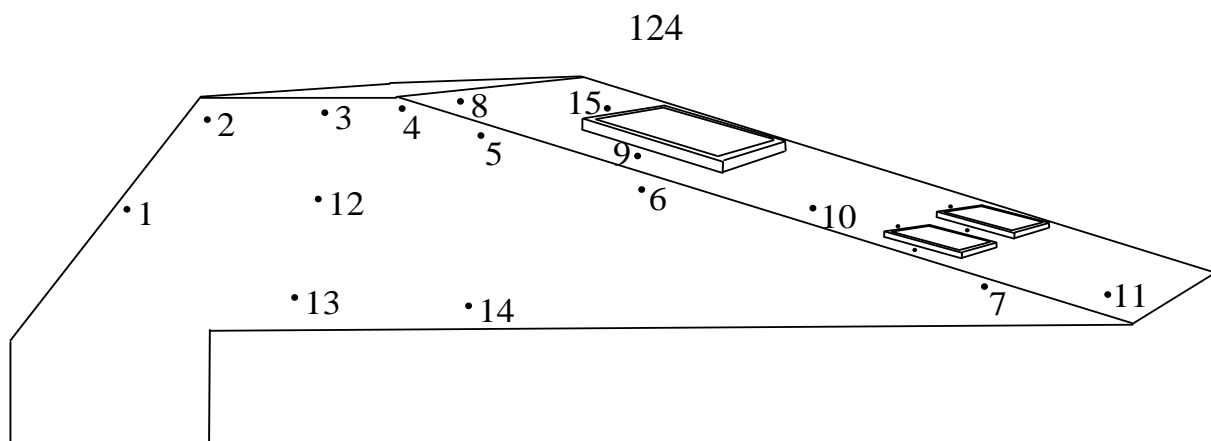


Рис. 7.4 - Схема расположения точек замера напряжений
(литая часть на схеме не показана)

Таблица 7.2

№ точки	Значения коэрцитивной силы, А/см					
	после сварки		после вибро- обработки		после термо- обработки	
	вдоль шва	поперек шва	вдоль шва	поперек шва	вдоль шва	поперек шва
1	2,9	2,7	2,8	2,9	2,3	2,3
2	3,5	3,4	3,3	2,9	2,5	2,4
3	2,9	2,9	3,0	2,8	2,3	2,3
4	2,7	2,8	2,8	2,8	2,3	2,5
5	2,9	3,8	3	2,8	2,6	2,4
6	3,4	2,7	3,2	2,7	2,6	2,4
7	2,9	2,9	2,4	2,8	2,5	2,5
8	3,6	2,9	2,9	3,6	2,7	2,5
9	3,7	2,6	3,8	2,8	2,6	2,5
10	3	3,3	2,7	2,9	2,7	2,5
11	2,9	3,3	3,1	3,3	2,4	2,7
12	2,6	2,7	2,5	2,7	2,3	2,2
13	2,1	2,9	2,7	2,8	2,3	2,3
14	2,7	3,1	2,7	3,1	2,4	2,5
15	3,2	3,2	3,4	3,2	2,6	2,7

Полученные значения изменения остаточных напряжений представлены в виде таблицы 7.3.

Изменение остаточных напряжений определялось, как произведение разности между значениями коэрцитивной силы в исследуемых точках балки после сварки и текущими значениями коэрцитивной силы на коэффициент пропорциональности K_M между значениями коэрцитивной силы и текущим значением напряжений. Принято $K_M = 67,61$ МПа·см/А.

Таблица 7.3.

№ точки	Изменение остаточных напряжений, МПа			
	после вибро- обработки	после термо- обработки	после вибро- обработки	после термо- обработки
	вдоль шва	поперек шва	вдоль шва	поперек шва
1	-6	12	-30	-36
2	-12	-30	-48	-30
3	6	-6	-42	-30
4	6	0	-30	-18
5	6	-60	-24	-24
6	-12	0	-36	-18
7	-30	-6	6	-18
8	0	0	-12	-66
9	6	12	-72	-18
10	-18	-24	0	-24
11	12	0	-42	-36
12	-6	0	-12	-30
13	36	-6	-24	-30
14	0	0	-18	-36
15	12	0	-48	-30

Как можно увидеть из анализа полученных результатов, в процессе виброобработки получены меньшие, чем при термообработке уменьшения напряжений. Однако при этом следует учитывать следующее:

1. Как уже говорилось выше, при вибрационной обработке снижаются напряжения, которые нарушают форму упругого равновесия

конструкции, в то время как при термической обработке снижаются напряжения во всей конструкции.

2. В силу того, что исследуемая крышка редуктора имеет массивное литое основание, то возникающие в ней, в процессе вибрационной обработки, динамические напряжения недостаточны для протекания релаксационных процессов в целом ряде точек, из точек, в которых проводились замеры это точки 8, 12-14. Что подтверждается полученными результатами.

Тем не менее, в целом ряде точек, в частности точки 2, 10 результаты получились сопоставимыми, а в точках 5,7 виброобработка показала большую эффективность. Но, в силу того, что релаксация остаточных напряжений в некоторых точках не происходила вообще, то, виброобработка с целью снятия остаточных напряжений для данной конструкции в целом показала недостаточную эффективность. Для жестких конструкций, к которым относится исследуемая, необходимо применение метода термообработки или виброобработка на специальных стендах в разогретом состоянии. Однако такой способ виброобработки пригоден только для массового производства одного класса конструкций, так как стоимость такого оборудования сопоставима со стоимостью самой конструкции.

ГЛАВА 8.

ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗЛОЖНИЦ

Одной из главных задач развития черной металлургии является повышение качества выплавляемой стали и готового проката, и снижение себестоимости. Одной из статей снижения себестоимости является эксплуатация сменного оборудования с минимальным расходным коэффициентом. Повышение качественных и экономических показателей металлургического производства частично зависит от качества и стоимости сталеразливочного оборудования в частности изложниц.

Учитывая, что сокращение расхода изложниц и повышения их стойкости является важным резервом в сокращении затрат на производство стали, необходимо больше внимания уделять качеству изготовления и эксплуатации изложниц. Известно, что расход изложниц зависит от большого числа факторов. К ним относятся: условия выплавки чугуна и его химический состав, технология отливки изложниц, температура и сортамент разливаемой стали, условия эксплуатации изложниц и др.

Проблемы повышения качества изложниц и их эксплуатации сохраняются актуальными и на ближайшее будущее.

Работы по возможности замены естественного старения вибрационной обработкой проводились на ОАО "Выксунский металлургический завод". При работах использовался виброкомплекс ВК-93М с максимальным развиваемым усилием 30 кН.

Для уменьшения влияния виброизолирующих опор на резонансные характеристики обрабатываемых изложниц, вибрационная обработка первых двух деталей проводилась с использованием крана. Изложница вывешена на тросе в горизонтальном положении. Вибровозбудитель закреплен в средней части обрабатываемой детали параллельно оси изложницы. На краю детали, на расстоянии около 1,2 м от вибровозбудителя был установлен пьезоэлектрический преобразователь - вибродатчик Д-13.

Выявление резонансных частот выполняется одновременно со сканированием нагрузочных характеристик до виброобработки, для этого был установлен дисбаланс виброблока 5%. Повышая последовательно обороты виброблока до 8000 об/мин, и контролируя величину потребляемого тока и вибрации по соответствующим указателям, было произведено сканирование. В виду большой жесткости детали, представляющей собой толстостенную трубу, ярко выраженных резонансных пиков не наблюдалось, одновременно с этим были отмечены несколько локальных резонансов в диапазоне от 3900-4000 об/мин до 7200-7400 об/мин.

Экспериментальным путем, исходя из качества поверхности изложницы в месте крепления виброблока, оснастки и способа его крепления, настройку дисбаланса виброблока установили на 40%.

Вибрационная обработка производилась путем плавного разгона виброблока до 8000 об/мин (~ 130 Гц), фиксированием и последующим снижением частоты, с остановками в ранее отмеченных точках резонансов и их обработкой в течение 2-3 мин в режиме девиации.

Сканирование нагрузочных характеристик после виброобработки проводилось при тех же условиях, что и до обработки. Дисбаланс виброблока устанавливался 5% и при плавном повышении оборотов до 8000 об/мин проводился контроль величины потребляемого тока.

По полученным результатам сканирования первой обработанной изложницы зав.№282(б-1) построили графики зависимостей потребляемого виброблоком тока I , А от числа оборотов n , об/мин и частоты возбуждаемых колебаний в Гц (см. рис. 8.1). На указанном рисунке график 1 соответствует потребляемому току до виброобработки, а график 2 - после виброобработки.

В ходе сканирования отмечалось снижение потребляемого виброблоком тока, что свидетельствует о релаксации внутренних напряжений.

После вибрационной обработки первая и все последующие изложницы маркировались белой краской на чистом от пригара месте четкими буквами «ВО» и номер в порядке виброобработки. В паспортах на

изложницы также делалась отметка об их прохождении вибрационной обработки.

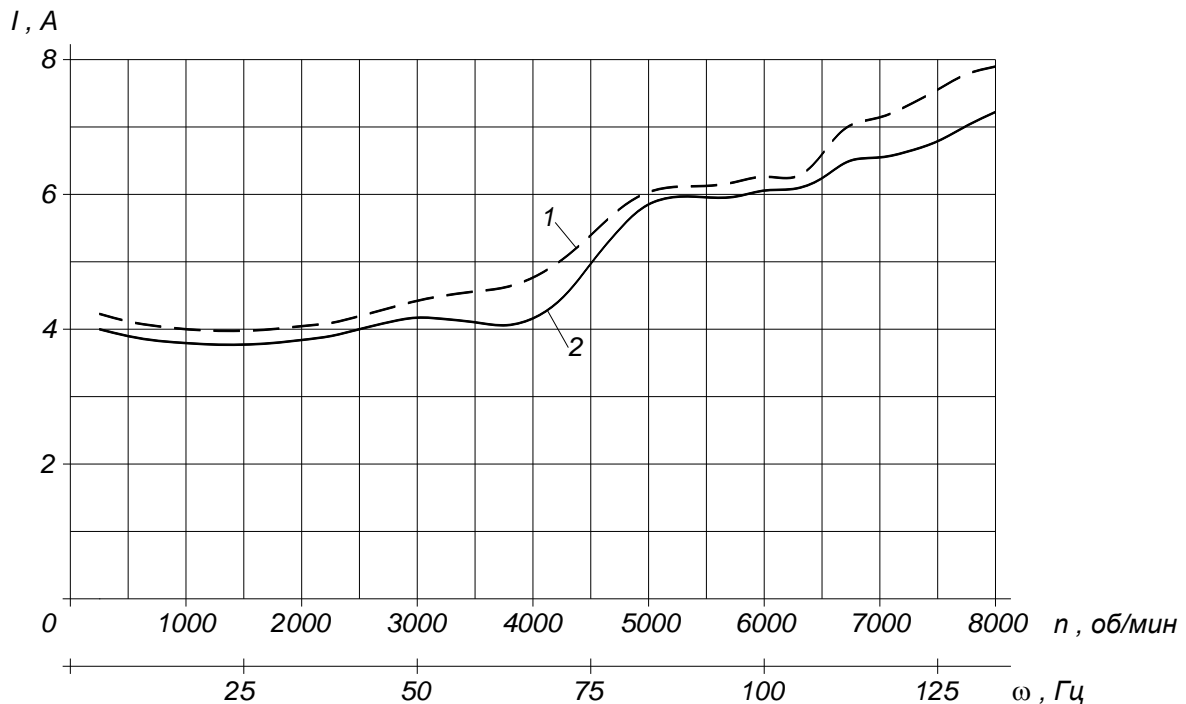


Рис 8.1 Амплитудно- частотная характеристика детали

На основании анализа условий и результатов обработки первых двух изложниц была проведена модернизация (усилена жесткость) оснастки крепления виброблока и изменена его ориентация - виброблок установлен перпендикулярно оси изложницы (рис 8.2). Это позволило поднять величину дисбаланса до 60-68% и, учитывая жесткость детали и отсутствие прямых методов контроля величины остаточных напряжений, надежно гарантировать успешное проведение вибрационной обработки.

На основании технологических схем:

- разработаны и выданы заказчику чертежи и техническая документация на изготовление креплений и оснастки для проведения вибрационной обработки деталей;

- установлены требования по качеству поверхностей изложниц и вкладышей, необходимых для надежного крепления виброблока и успешного проведения вибрационной обработки;

- изготовлены крепление и оснастка;

-в обрубном участке ЧЛЦ выделено и обустроено место для установки электронной аппаратуры и место для установки изложниц и вкладышей для вибрационной обработки.



Рис 8.2. Закрепление виброблока на конструкции.

При вибрационной обработке следующих восьми изложниц (с 3 по 10) проводилось выявление резонансных частот, сканирование нагрузочных характеристик до виброобработки и после нее, а также отработка режимов самой виброобработки. Причем, сканирование нагрузочных характеристик изложниц с 5-ой по 10-ю выполнялось при дисбалансе виброблока 0 %.

Полученные данные свидетельствуют о типичности и стабильности резонансных и нагрузочных характеристик для всех изложниц, так как резонансы в указанном ранее диапазоне частот и снижение потребляемого виброблоком тока после проведения виброобработки не имели существенных различий.

Исходя из этого, для дальнейшей работы были приняты следующие режимы проведения непосредственно вибрационной обработки:

-дисбаланс - 60-68%;

-плавное повышение скорости вращения двигателя виброблока до 8000 об/мин и фиксация;

-снижение до 7200 об/мин и обработка в течение 4-5 мин в режиме девиации;

-снижение до 6200-6250 об/мин и обработка в течение 5 мин в режиме девиации;

-снижение до 5200-5300 об/мин и обработка в течение 5 мин в режиме девиации;

-снижение до 4200-4300 об/мин и обработка в течение 5 мин в режиме девиации;

-дальнейшее снижение до 0 об/мин в режиме девиации. Дальнейшая вибрационная обработка всех изложниц производилась по указанным выше режимам.

При вибрационной обработке следующих десяти изложниц (с 11 по 20) также проводилось выявление резонансных частот, сканирование нагрузочных характеристик до виброобработки и после нее. Стабильность резонансных и нагрузочных характеристик сохранялась, что позволило при обработке последующих изложниц отказаться от режимов сканирования и увеличить производительность. В итоге время выполнения непосредственно вибрационной обработки (без подготовительно-заключительного времени) составила около 27 минут.

С учетом вышеизложенного была выполнена вибрационная обработка всей партии изложниц. Все изложницы были маркированы белой краской на чистом от пригара месте четкими буквами «ВО» и номер в порядке виброобработки, а в паспортах сделаны соответствующие отметки.

Анализ приведенных графиков нагрузочных характеристик и последующих сканирований изложниц показывает, что наблюдается снижение потребляемого виброблоком тока после вибрационной обработки от 2,5% до 6,8% и более. Это характерно для всех обрабатываемых деталей и свидетельствует о том, что при вибрационной обработке интенсивно происходит процесс релаксации внутренних остаточных напряжений.

Таким образом, задача по снятию внутренних остаточных напряжений в отливках изложниц успешно выполнена. После вибрационной обработки все изложницы были направлены для ввода в эксплуатацию и должны быть обеспечены наблюдением и контролем.

Изложницы прошедшие виброобработку отработали положенный ресурс (более 100 наливов), из чего сделаны выводы о возможности полной замены естественного старения изложниц на вибрационную обработку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения / Биргер И. А. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Mordfin L. Mechanical Relaxation of Residual Stresses / Mordfin L. – New York : NASTM International, 1988. – 120 p.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. / Фридман Я. Б. – М. : Машиностроение, 1974.– Ч. 1: Деформация и разрушение. – 472 с.
4. James M. N. Design, manufacture and materials; their interaction and role in engineering failures / James M. N. // Engineering Failure Analysis. – 2005. – Vol. 12, Issue 5. – P. 662–678.
5. Influence of residual stress on thermal expansion behavior / X. L. Wang, C. M. Hoffmann, C. H. Hsueh, G. Sarma, C. R. Hubbard, J. R. Keiser // Appl. Phys. Lett. – 1999. – № 75.– P. 3294–3296.
6. Experimental determination of the residual stresses in a spiral weld overlay tube / X. L. Wang, E. A. Payzant, B. Taljat, C. R. Hubbard, J. R. Keiser // Mater Sci Eng. –1997. –№ 232.– P. 31–38.
7. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Лахтин Ю. М. – М. : Metallurgia, 1969. – 360 с.
8. Коцюбинский О. Ю. Коробление чугуновых отливок от остаточных напряжений / Коцюбинский О. Ю. – М. : Машиностроение, 1965. – 176 с.
9. Мартин Д. Ж. Стабильность микроструктуры металлических систем / Д. Ж. Мартин, Р. Доэрти ; пер. с англ. – М. : Атомиздат, 1978. – 280 с.
10. Arsenault R. J. Thermal residual stress in metal matrix composite / R.J. Arsenault, M. Taya // ACTA metallurg. –1987. –Vol. 35, № 3. – P. 651–659.
11. Bereznyts'ka M. P. Methods for determining residual welding stresses and their relief (a review) / Bereznyts'ka M. P. // Materials Science. – 2001. –Vol. 37, № 6. – P. 933–939.

12. Zhang J. Residual stresses in welded moment frames and implications for structural performance / J. Zhang, P. Dong // J. Struct. Engrg. – 2000. – Vol. 126, Issue 3. – P. 306–315.

13. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Мороз Л. С. – Л. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

14. Michaleris P. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures / P. Michaleris, J. Dantzig, D. Tortorelli // Welding Journal (USA). – 1999. – Vol. 78, № 11. – P. 361–366.

15. Бернштейн М. Л. Структура и механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М. : Metallurgia, 1970. – 472 с.

16. Druyanov B. A. Mathematical modeling of the processes of plastic working of metal powders and porous solids / B. A. Druyanov, I. D. Radomysel'skii, M. B. Shtern // Poroshk. Metall. – 1981. – Vol. 20, № 3. – P. 6–12.

17. Hsu H. C. An elasto-viscoplastic finite element model of orthogonal metal cutting for residual stress prediction / H. C. Hsu // Dissertation Abstracts International (USA). – 1993. – Vol. 53, № 11. – P. 6–7.

18. Jacobus K. Machining-induced residual stress : experimentation and modeling / K. Jacobus, R. E. DeVor, S. G. Kapoor // Journal of Manufacturing Science and Engineering (USA). – 2000. – Vol. 122, № 1. – P. 20–31.

19. Okushima K. Study of the residual stress produced by metal cutting / K. Okushima, Y. Kakino // Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. – 1972. – Vol. 34, № 2. – P. 234–248.

20. Коцюбинский Ю. О. Стабилизация размеров чугуновых отливок / Коцюбинский Ю. О. – М. : Машиностроение, 1974. – 296 с.

21. Блантер М. Е. Теория термической обработки / Блантер М. Е. – М. : Metallurgia, 1984. – 328 с.

22. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гульс, И. Е. Долженков. – М. : Metallurgia, 1972. – 320 с.

23. Горенко В. Г. Статические и динамические способы снижения уровня остаточных напряжений и стабилизации размеров отливок / В. Г. Горенко, П. В. Русаков // Повышение надежности и долговечности литых деталей : сб. науч. трудов. – К. : Институт проблем литья АН УССР, 1987. – С. 23–39.

24. Munsif A. S. M. Y. Use of static stress for modification of welding residual stresses / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2002. – Vol. 7, № 1. – P. 51–55

25. Рагульскис К. М. Вибрационное старение / К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, К. Б. Толутис. – Л. : Машиностроение, 1987. – 72 с.

26. Скаковский В. Д. Разработка технологии вибрационной обработки сварных конструкций балочного типа : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии» / Скаковский В. Д. – К., 1987. – 16 с.

27. Reduction of residual stress for welding joint using ultrasonic vibrational load / Sh. Aoki, T. Nishimura, T. Hiroi, S. Hirai // *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu C Hen*. – 2001. – Vol. 13, № 5. – P. 1613–1618.

28. Aoki Sh. Reduction of residual stress for welded joints using vibrational load / Sh. Aoki, T. Nishimura // *ASME Pressure Vessels Piping Div. Publ. PVP*. – 1998. – Vol. 370. – P. 27–32.

29. Munsif A. S. M. Y. Modification of residual stress by post-weld vibration / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker // *Materials Science and Technology*. – 2001. – Vol. 17. – P. 601–605.

30. Vibrational Stress-Relief of Cast Iron Castings / C. Balasingh, M. R. Seshadri, M. N. Srinivasan, S. Ramaseshan // *Indian Foundry J*. – 1983. – Vol. 29, № 11. – P. 129–136.

31. Sun M. C. Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel / M. C. Sun, Y. H. Sun, R. K. Wang // *Materials Letters*. – 2004. – Vol. 58, № 7–8. – P. 1396–1399.

32. Sun M. C. The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel // M. C. Sun, Y. H. Sun, R. K. Wang // *Materials Letters*. – 2004. – Vol. 58, Issues 3–4. – P. 299–303.

33. James M. N. Constant and variable amplitude loading of 6261 aluminium alloy I-beams with welded cover plates — Influence of weld quality and stress relief / M. N. James, A. E. Paterson, N. Sutcliffe // *International Journal of Fatigue*. – 1997. – Vol. 19, Issue 2. – P. 125–133.

34. James M. N. Fatigue performance of 6261-T6 aluminium alloy — constant and variable amplitude loading of parent plate and welded specimens /

M. N. James, A. E. Paterson // International Journal of Fatigue. – 1997. – Vol. 19, Issue 93. – P. 109–118.

35. Delin R. Vibratory Stress Relief in Manufacturing the Rails of a Maglev System / R. Delin, G. Jingguo, C. Ligong // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. – Vol. 126, № 2. – P. 388–391.

36. Stress and Relief of Misfit Strain of GeSi(001) / T. Hesjedal, E. Chilla, R. Koch, G. Wedler, J. Walz // Physical review letters. – 1998. – № 80 (11). – P. 2382–2385.

37. Garcia A. Stress relief from alternately buckled dimers in Si(100) / A. Garcia, J. E. Northrup // Physical review – condensed matter and materials physics. – 1993. – № 48 (23). – P. 17350–17353.

38. Hebel G. Residual Stress Measurement Techniques / Hebel G. // Advanced Materials & processes. – 1986. – № 8. – P. 30–33.

39. James M. R. Relaxation of Residual Stresses: an overview / James M. R. // Advances in Surface Treatments: technology-applications-effects. – 1987. – Vol. 4. – P. 349–365.

40. Prime M. B. Residual stress, stress relief and inhomogeneity in aluminum plate / M. B. Prime, M. R. Hill // Scripta Materialia. – 2002. – Vol. 46, № 1. – P. 77–82.

41. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка в серийном производстве сварных мостов ведущих колес зерноуборочных комбайнов «Дон – 1500» / А. И. Дрыга, Ю. В. Калкин, Е. А. Макаров // Применение колебаний в технологиях : материалы докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конференции. – Винница : ВДАУ, 1994. – С. 138–142.

42. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка чугунных трубингов метрополитена / А. И. Дрыга, В. М. Грищенко, В. В. Антонов // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века : сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь ; Донецк : ДонГТУ, 1999. – Т. 1. – С. 242–244.

43. Дрыга А. И. Исследование изменений технологических остаточных напряжений в заготовке кованого вала ротора после вибростабилизирующей обработки / Дрыга А. И. // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – № 3 (24). – С. 37–39.

44. Контроль остаточных напряжений в металле после пластической деформации в поковках автоматическим рентгеновским дифрактометром «Страйнфлекс» / А. И. Дрыга, С. В. Подлесный, А. Ю. Деньщиков, И. В. Буслик // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 91–94.

45. Электромагнитные генераторы механических колебаний и тиристорные инверторы в системах вибрационной обработки сварных конструкций / И. Б. Гудонис, К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, В. В. Юренас // Управление сварочными процессами : межвузовский сб. науч. трудов. – Тула : ТПИ, 1982. – С. 120–126.

46. Дрыга А. И. Влияние поэтапной вибростабилизирующей обработки на снижение остаточных напряжений в подшипниковых щитах крупного электрического оборудования / А. И. Дрыга // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 11. – С. 30–32.

47. Дрыга А. И. Исследование процесса снижения остаточных напряжений в ответственных деталях подшипниковых узлов крупных электрических машин при воздействии вибростабилизирующей обработки поэтапно после операций сварки, механообработки и сборки / А. И. Дрыга // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – № 2 (23). – С. 15–19.

48. Семенов В. М. Виброобработка крупных сварных конструкций тяжелого машиностроения / В. М. Семенов, В. Е. Соломатин, Т. М. Новоселова // Сварочное производство. – 1981. – № 8. – С. 15–26.

49. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных корпусных деталей электрических машин и гидрогенераторов / Дрыга А. И. // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 23–25.

50. Дрыга А. И. Вибрационная обработка сварного корпуса концевой части турбогенератора для снижения остаточных напряжений / Дрыга А. И. // Сварочное производство. – 1990. – № 6. – С. 10–11.

51. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка корпуса статора крупной электрической машины путем одновременного воздействия двумя вибраторами на разных частотах / Дрыга А. И. // Прогресивні технології та

системы машинобудування: міжнародний збірник наукових трудів. – Донецьк : ДонГТУ, 2001. – Вып. 16. – С. 195–199.

52. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений / А. Я. Недосека, А. А. Грузд, О. И. Зубченко, С. Б. Ищенко // Автоматическая сварка. – 1974. – № 3. – С. 66–69.

53. Нашивочников В. В. Разработка и исследование метода устранения деформаций вибрацией с нагружением : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец 05.04.05 «Технология и машины сварочного производства» / Нашивочников В. В. – М., 1978. – 16 с.

54. Зубченко О. И. Исследование и разработка способов устранения остаточных напряжений в сварных конструкциях вибрационным и ультразвуковым нагружением : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец 05.04.05 «Технология и машины сварочного производства» / Зубченко О. И. – К., 1974. – 26 с.

55. Колот А. В. Повышение надежности технологии вибростабилизирующей обработки на основе оптимизации ее режимов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.08 / Колот Александр Владимирович. – К., 1997. – 166 с.

56. Винокуров В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

57. Недосека А. Я. Влияние деформаций по толщине на остаточные напряжения в пластине со сварной точкой // Автоматическая сварка. – 1973. – № 7. – С. 30–34.

58. Григолюк Э. И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин / Э. И. Григолюк, Я. С. Подстригач, Я. И. Бурак. – К. : Наукова думка, 1979. – 364 с.

59. Подстригач Я. С. Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинах / Я. С. Подстригач, Ю. М. Коляно. – К. : Наукова думка, 1979. – 308 с.

60. Казимиров А. А. Аналитическое описание процесса образования продольных сварочных деформаций и напряжений / А. А. Казимиров, А. Я. Недосека, А. И. Лобанов // Автоматическая сварка. – 1969. – № 2. – С. 39–44.

61. Талыпов Г. Б. Сварочные деформации и напряжения / Талыпов Г. Б. – Л. : Машиностроение, 1973. – 278 с.
62. Игнатьева В. С. Распределение собственных напряжений в пластинах, сваренных встык за один проход / Игнатьева В. С. // Сварочное производство. – 1956. – № 3. – С. 12–17.
63. Чернов Д. К. Избранные труды по металлургии и металловедению / Чернов Д. К. – М. : Наука, 1983. – 256 с.
64. Вибростабилизирующая обработка металлических деталей / Г. Н. Иванова, М. Н. Могильнер, В. Г. Полнов, О. Г. Чикадили. – М. : КазНИИИТИ, 1987. – 60 с.
65. Gnirss G. Vibration and vibratory stress relief. Historical development, theory and practical application / Gnirss G. // Welding in the World. – 1988. – Vol. 26, № 11–12. – P. 284–291.
66. Claxton R. A. Vibratory stress – relieving practice and theory / Claxton R. A. // Heat Treat. Meth. And media. – Birmingham: Exhib. Inst. Met. Techn. – 1979. – P. 34–45.
67. Rappen A. Vibration nach dem VSR. Verfahren zur Verminderung des Eigenspannungsverzugs / Rappen A. // Lasttechnik. – 1972. – № 10. – S. 223–233.
68. Wozney G. P. An investigation of vibrational stress relief in steel / G. P. Wozney, G. R. Crawler // Welding Journal. – 1968. – № 2. – P. 411–419.
69. Раппен А. Описание метода использования вибрации в области механической обработки для изменения внутренних напряжений в металлах / А. Раппен ; пер. с нем. – М. : Всесоюзный центр переводов, 1972. – 32 с.
70. Пат. 3622404 US, МПК C22F 3/00. Method and apparatus for stress relieving a workpieces by vibration / Thompson L.E. – № 800666 ; заявл. 19.02.69 ; опубл. 23.11.71. – 9 с.
71. Коцюбинский О. Ю. Вибрационное старение чугунных отливок / О. Ю. Коцюбинский, А. М. Герчиков, Э. Ч. Гини // Литейное производство. – 1962. – № 4. – С. 31–34.
72. Гини Э. Ч. Вибрационное старение чугунных деталей / Гини Э. Ч. – Ереван : Айастан, 1970. – 144 с.

73. Анистратов В. Д. Вибрационное старение корпусных чугунных деталей станков : обзор / В. Д. Анистратов, Э. Ч. Гини. – М. : НИИмаш, 1981. – 36 с.

74. Сагалевиц В. М. Выбор режимов для вибрационной обработки сварных конструкций из низкоуглеродистой стали с целью стабилизации их размеров / В. М. Сагалевиц, А. С. Аверин. – М., 1982. – 12 с. – Деп ВНИИмаш № 153-82.

75. Walker C. A. Vibratory stress relief – an investigation of the underlying processes / C. A. Walker, A. J. Waddell, D. J. Johnston // *Journal of Process Mechanical Engineering*. – 1995. – Vol. 209, № E1. – P. 51–58.

76. Лащенко Г. И. Вибрационная обработка сварных конструкций / Лащенко Г. И. – К. : Экотехнология, 2001. – 56 с.

77. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. Теория, исследования, технология / Дрыга А. И. – Краматорск : ДГМА, 2004. – 168 с.

78. Silversides R. Force Analysis of a Vibratory Bowl Feeder for Automatic Assembly / R. Silversides, S. D. Jian, L. Seneviratne // *Journal of Mechanical Design* – 2005. – Vol. 127, Issue 4. – P. 637–645

79. Matikas T. Specimen design for fatigue testing at very high frequencies / Matikas T. // *Journal of sound and vibration*. – 2001. – № 247 (4). – P. 673–681.

80. Luh G. C. Evaluating the Effectiveness of Vibratory Stress Relief by a Modified Hole-Drilling Method / G. C. Luh, R. M. Hwang // *International journal of advanced manufacturing technology*. – 1998. – № 14 (11). – P. 815–823.

81. Li Q. Vibratory stress relief (VSR) theory and applications on eliminating the residual stress / Q. Li, J. Q. Peng // *Huabei-Gongxueyuan-xuebao*. – 2001. – Vol. 22, Part 3. – P. 186–189

82. Yang X. Analysis of vibratory mechanics on vibratory stress relief / X. Yang // *Hanjie-xuebao : jikan*. – 2000. – Vol. 21, Part 1. – P. 79–82.

83. Zhuang W. Z. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load / W. Z. Zhuang, G. R. Halford // *International Journal of Fatigue*. – 2001. – Vol. 23, Supplement 1. – P. 31–37.

84. Delin R. Research state of vibratory stress relief / Delin R. // Hanjie. – 2004. – № 11. – P. 5–7.

85. Vibratory stress relief- recent developments // Metallurgia: the journal of metals technology, metal forming & thermal processing. – 2000. – №1. – S. 49–54.

86. Yang T. J. Practice of vibratory stress relief method in production / Yang T. J. // Zhuzao-jishu : shuangyuekan. – 2002. – Vol. 23. Part 2. – P. 109–110.

87. Research on Vibratory Stress Relief Mechanism // Jixie-kexue-yujishu. – 2001. – Vol. 20, Part 4. – P. 587–589.

88. Koepfer C. Vibratory Stress Relief / Koepfer C. // Modern machine shop. – 2001. – Vol. 73, Part 12. – P. 64–69.

89. Полнов В. Г. Влияние вибрационной обработки на механические свойства сварных соединений низкоуглеродистой стали 09Г2С / В. Г. Полнов, О. Г. Чикадили, Г. Н. Иванова, М. Н. Могильнер // Сварочное производство. – 1991. – № 6. – С. 20–21.

90. Соломатин В. Е. Влияние низкочастотной вибрационной обработки на свойства сварных соединений стали 16Д / В. Е. Соломатин, И. М. Изюрьев, Н. Ф. Бабина // Автоматическая сварка. – 1984. – № 2. – С. 72–73.

91. Анкирский Б. М. Влияние вибрационной и термической обработки на механические свойства металла и сварного соединения стали 20К // Сварочное производство. – 1985. – № 3. – С. 19–21.

92. Influence of stress relieving by vibration on the fatigue behaviour of welded joints in comparison to post-weld heat treatment / C. M. Sonsino, F. Muller, J. D. Back, A. M. Gresnigt // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1996. – Vol. 19, № 6. – P. 703–708.

93. Dawson R. Vibratory stress relief – A fundamental study of its effectiveness / R. Dawson, D. G. Moffat // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1980. – Vol. 102. – P. 169–176.

94. Jsensky M. Mechanicke preskupovanie zvyškovych napätí vibračnou metódou. II etapa / M. Jsensky // Vyskumna sprava. – Bratislava : Vúz, ev. č., 1980. – S. 217–220.

95. Янус Ю. Р. Исследование влияния вибрационного воздействия на релаксацию остаточных напряжений, структуру и свойства конструкционных сталей и алюминиевых сплавов : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.04 «Литейное производство» / Янус Ю. Р. – Свердловск, 1988. – 21 с.

96. Гуцайлюк В. Б. Вплив попереднього циклічного навантаження на опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла» / Гуцайлюк В. Б. – Тернопіль, 2001. – 18 с.

97. Снижение сварочных напряжений в пластинах с помощью вибрации / А. А. Грузд, О. И. Зубченко, А. А. Казимиров, А. Я. Недосека // Автоматическая сварка. – 1972. – № 7. – С. 75–76.

98. Лащенко Г. И. Технологические особенности дуговой сварки в углекислом газе с вибронгружением / Лащенко Г. И. // Свариваемость и технология сварки конструкционных сталей и чугунов. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 98–104.

99. Полнов В. Г. Влияние собственных колебаний сварных конструкций на устранение в них остаточных напряжений вибрацией / В. Г. Полнов, В. М. Сагалевиц, М. Н. Могильнер // Сварочное производство. – 1988. – № 4. – С. 37–39.

100. Грузд А. А. Исследование деформации сварных конструкций во времени и изыскание способов их учета и стабилизации / Грузд А. А. – К. : Вища школа. – 1973. – 192 с.

101. Полнов В. Г. Определение режимов вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений / В. Г. Полнов, М. Н. Могильнер // Сварочное производство. – 1984. – № 2. – С. 32–33.

102. Munsif A. S. M. Y. Vibratory weld conditioning-the effect of rigid body motion vibration during welding / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C.A. Walker // STRAIN : Journal of the British Society for Strain Measurement. – 1999. – Vol. 35, № 4. – P. 139–143.

103. Munsif A. S. M. Y. Vibratory stress relief – an investigation of the torsional stress effect in welded shafts / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell,

C. A. Walker // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2001. – Vol. 36, № 5. – P. 453–464.

104. Munsif A. S. M. Y. Vibratory Weld Conditioning: Treatment of Specimens During Cooling / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker // *Journal of Materials : Design and Applications*. – 2000. – Vol. 214, № 3. – P. 129–138.

105. Munsif A. S. M. Y. The Influence of Vibratory Treatment on the Fatigue Life of Welds: A Comparison with Thermal Stress Relief / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker // *Strain : journal of the British Society for Strain Measurement*. – 2001. – Vol. 37, Part. 4. – P. 141–150.

106. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review / K. J. Kirkhopea, R. Bellb, L. Caronc, R. I. Basud, K. T. Ma // *Marine Structures*. – 1999. – Vol. 12, Issue 6. – P. 447–474.

107. Lin Y. C. Effect of residual stress on thermal fatigue in a type 420 martensitic stainless steel weldment / Y. C. Lin, S. C. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 138, Issues 1–3. – P. 22–27.

108. Birley S. S. Residual Stresses in welded joints and the effects of mechanical surface treatments / S. S. Birley, M. J. Morton, J. F. Alder // *Conference residual stresses in welded construction and their effects*. – London : Welding Institute, 1977. – P. 185–195.

109. Residual stresses in steel and zirconium weldments / J. H. Root, C. E. Coleman, J. W. Bowden, M. Hayashi // *Journal Pressure Vessel Technol.* – 1997. – № 2 – P. 137–141.

110. Tida K. Residual stress relaxation by reversed loading / K. Tida, S. Jamamoto, M. Takanashi // *Weld. World*. – 1997. – № 3. – P. 138–144.

111. Kristov S. Longitudinal residual welding strains and stresses in edge welded joints / S. Kristov // *Tekhn. Misl.* – 1996. – № 1. – P. 95–103.

112. Murakami Z. A study on residual stress relief method of austenitic stainless steel weld joint / Z. Murakami, M. Nishida // *Echime Daigaku Kogakubu*. – 1988. – № 3. – P. 467–478.

113. Сагалевиц В. М. Устранение деформаций сварных балочных конструкций вибрацией / В. М. Сагалевиц, Н. Н. Завалишин, В. В. Нашивочников // *Сварочное производство*. – 1979. – № 9. – С. 9–12.

114. Дегтярев В. А. Влияние виброобработки конструктивных элементов с остаточными напряжениями на их демпфирующую способность / В. А. Дегтярев, Б. С. Шульгинов // Проблемы прочности. – 1997. – № 5. – С. 113–121.

115. Снижение виброобработкой остаточных напряжений в сварных элементах / Е. П. Оленин, А. С. Аверин, Е. В. Добротина, О. К. Алексеев // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 11–13.

116. Насыров Г. Х. Разработка и исследование метода повышения точности и размерной стабильности сварных конструкциях балочного типа из высокопрочных сталей путем снижения остаточных напряжений вибрацией : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.04.05 «Технология и машины сварочного производства» / Насыров Г. Х. – М., 1992. – 13 с.

117. Касаткин Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.

118. Алешин Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия: Справ. пособие.// Н. П.Алешин, В. Г.Лупачев — Мн.: Выш. шк., 1987. — 271 с.

119. *Иванов С.Ю. и др.*; Производство сертифицированных рабочих средств измерения остаточных напряжений в металлах и сплавах// Металлообработка. 2001. № 1. С. 67-72.

120. *Власов В.Т., Дубов А.А.* Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО "ТИССО", 2004, 424с.

121. *Паньковский Ю.П.* Аппаратная реализация некоторых магнитных методов неразрушающего контроля//Мир измерений. 2005. №5. С. 9-12.

122. *Безлюдько Г.Я и др.* Оценка текущего состояния остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля// Контроль.Диагностика. 2002. №1. С. 45-48.

123. *Горкунов Э.С. и др.* Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик//Дефектоскопия. - 1997. № 4. С. 87-95.

124. Bazant Z. P. *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories* / Z. P. Bazant, L. Sedolin. – Mineola : Dover Publication, 2003. – 1034 p.

125. Cadic A. *A Gauge theory of dislocations and disclinations* / A. Cadic, D. Edelen. – Berlin : Springer-Verlag, 1983. – 174 p.

126. Лившиц Б. Г. *Металлография* / Б. Г. Лившиц. – М. : Металлургия, 1971. – 404 с.

127. Панин В. Е. *Деформация и разрушение поликристаллов при знакопеременном нагружении как диссипативный процесс* / В. Е. Панин, Т. Ф. Елсукова // *Синергетика и усталостное разрушение металлов : сборник научных трудов*. – М. : Наука, 1989. – С. 113–137.

128. Йоффе А. Й. *Избранные труды : в 2 т.* / А. Й. Йоффе. – Л. : Наука, 1974. – Т. 1: *Механические и электрические свойства кристаллов*. – 1974. – 326 с.

129. Панин В. Е. *Структурные уровни деформации твердых тел* / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. – Новосибирск, 1985. – 226 с.

130. Venkataraman G. *Fluctuations and mechanical relaxation* / Venkataraman G. // *Proc. Intern School Phys. «Enrico Fermi» course LXXXII*. – Amsterdam, N. Y., Oxford, North-Holland. – 1982. – P. 278–414.

131. Yoshioka S. *Serrated flow in Al-Zr alloy* / S. Yoshioka, Y. Nakayama, N. Hosokawa // *Journal Japan institute metals*. – 1970. – Vol. 20. № 10. – P. 509–519.

132. Данилов В. И. *Волновые эффекты при пластическом течении поликристаллического алюминия* / В. И. Данилов // *Физика металлов и металловедение*. – 1991. – № 3. – С. 188–194.

133. Грабар И. Г. *Дискретные явления в механике разрушения с позиции синергетики* / И. Г. Грабар // *Синергетика и усталостное разрушение металлов : сборник научных трудов*. – М. : Наука, 1989. – С. 191–199.

134. Судник В. К. *Механизм релаксации остаточных напряжений при циклическом нагружении (виброобработке)* / В. К. Судник, А. П. Ярлыков // *Управление сварочными процессами*. – Тула : Тульск. политехн. ин-т, 1980. – С. 62–68.

135. Jamesa M. N. Fatigue performance of 6261-T6 aluminium alloy – constant and variable amplitude loading of parent plate and welded specimens / M. N. Jamesa, A. E. Patersonb // *International Journal of Fatigue*. – 1997. – Vol. 19, Issue 93. – P. 109–118.

136. Munsu A. S. M. Y. The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution / A. S. M. Y. Munsu, A. J. Waddell, C. A. Walker // *Journal of Materials: Design and Applications*. – 2001. – Vol. 215, № 2. – P. 99–111.

137. Pucko B. Charpy toughness of vibrated microstructures / B. Pucko, V. Glina // *Metalurgija*. – 2005. – № 2. – P. 103–106.

138. Kalna K. Mechanical stress-relief treatment of welded pressure vessels by warm pressure test / Kalna K. // *Stress relieving heat treatments of welded steel constructions: Proceedings Conference*. – Sofia. – 1987. – P. 177–188.

139. Batyuk V. V. Efficiency of application of heat- and vibro-treatment to reduce residual stresses in weldments / V. V. Batyuk, A. A. Khryplivy, S. K. Fomichev, S. N. Minakov, P. N. Gansky // *Stress relieving heat treatments of welded steel constructions : Proceedings Conference*. – Sofia. – 1987. – P. 343–345.

140. Sedek P. Vibratory Stress Relief of Welded Components / Sedek P. // *Welding International*. – 1988. – № 2 – P. 127–129.

141. Berns I. V. Verzug von Stählen infolge Wärmebehandlung / Berns I. V. // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – Vol. 8, Issue 5. – P. 149–157.

142. Ohol R. D. Measurement of vibration-induced stress relief in the heavy fabrication industry / R. D. Ohol, B. V. Nagendra Kumar, R. A. Noras // *Mechanical relaxation of residual stresses : Proceedings Conference*. – Philadelphia : American society for testing and materials, 1988. – P. 45–47.

143. Vibratory stress relief of welded parts / C. Bouhelier, P. Barbarin, J. P. Deville, B. Miege // *Mechanical relaxation of residual stresses : Proceedings Conference*. – Philadelphia : American society for testing and materials, 1988. – P. 58–71.

144. Prohaszka J. Vibration – induced internal stress relief / J. Prohaszka, B. Hidasi, L. Varga // *Periodica polytechnica*. – 1975. – № 19. – P. 69–78.

145. Freedman H. The influence of vibration on solidifying metals / H. Freedman, J. F. Wallace // Transactions of the American Foundryman's Society. – 1957. – Vol. 65. – P. 58–62.

146. Garlick R. G. Grain refinement of solidifying metals by vibration / R. G. Garlick, J. F. Wallace // Transactions of the American Foundryman's Society. – 1959. – Vol. 67. – P. 26–30.

147. Fisher T. P. Effects of vibrational energy on the solidification of aluminum alloys / Fisher T. P. // British Foundryman. – 1973. – Vol. 66. – P. 251–255.

148. Crawmer G. R. The effect of sonic or ultrasonic vibration of a consumable electrode during Arc Welding / G. R. Crawmer // Ohio State University thesis. – 1965. – P. 32–37.

149. Tewari S. P. Effects of longitudinal vibration on hardness of the weldments / S. P. Tewari, A. Shanker // ISIJ International. – 1993. – № 12. – P. 1265–1269.

150. Hebel T. Der bessere weg zum spannungsabbau / T. Hebel, R. Kreis // Metall. – 1983. – № 3. – P. 259–261.

151. Weite W. Influence of vibration frequency on solidification of weldments / Weite W. // Scripta Materialia. – 2000. – № 7. – P. 661–665.

152. Effect of mechanical vibration on TLP brazing with BNi-2 nickel – based filler metal / W. Xiaowei, L. Hang, R. S. Chandel, H. P. Seov // Journal of material science letters. – 1999. – № 18. – P. 1615–1617.

153. Starkey J. P. The effect of vibratory stress relief on metal fatigue in steel weldments // Faculty of the College of Applied Science and Technology Central Missouri State University: master degree thesis. – 1987. – P. 39–43.

154. Klauba B. B. Progress report on the use and understanding of vibratory stress relief / B. B. Klauba, C. M. Adams // Proc. ASME Conf. on Productive Applications of Mechanical Vibrations. – Arizona : Phoenix, 1982. – P. 47–58.

155. Weidner C. W. A study of the effects of low frequency mechanical vibration during welding on the resulting residual stresses and microstructure / Weidner C. W. // The Ohio state university: master degree thesis. – 1967. – P. 88–94.

156. Брусиловский Б. А. Исследование влияния восстановительной вибрационной и вибротермической обработки на изменение структуры

металла в трубах паропроводов / Б.А. Брусиловский, А. И. Дрыга // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №2 (18). – С. 35–38.

157. Брусиловский Б. А. Исследование структурных изменений в закаленной стали после вибрационной обработки / Б. А. Брусиловский, А. И. Дрыга // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 5 (31). – С. 3–5.

158. Шухостанов В. К. Виброобработка крупногабаритных сварных конструкций из титановых сплавов / В. К. Шухостанов, А. А. Галяш, А. А. Ильичев // Автоматическая сварка. – 1993. – № 2. – С. 39–42.

159. Вибростабилизирующая обработка чугунного корпуса задней бабки тяжелого токарного станка / А. И. Дрыга, И. Н. Бондаренко, С. В. Подлесный, А. Ю. Деньщиков, А. Н. Беш // Прогресивні технології та системи машинобудування: міжнародний збірник наукових трудов. – Донецьк : ДонНГТУ, 2004. – Вып. 15. - С. 123-128.

160. Брусиловский Б. А. Исследование влияния виброобработки на снижение деформаций коробления и припусков на механическую обработку сварных тонкостенных деталей из алюминиевых сплавов / Б. А. Брусиловский, А. И. Дрыга // Вибрации в технике и технологиях : тр. III Междунар. науч.-техн. конф. – Евпатория, 1998. –С. 96–99.

161. Русаков П. В. Совершенствование способов применения динамического нагружения для интенсификации процессов старения отливок : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Русаков Петр Владимирович. – К., 2002. – 244 с.

162. Реология : теория и приложения / под ред. Эйриха Ф. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. – 824 с.

163. Einstein A. Investigations on the Theory of the Brownian Movement / Einstein A. // Ann. Physik. –1906. – № 19 (371).– P. 289–305.

164. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред / Шермергор Т. Д. – М. : Наука, 1977. – 204 с.

165. Работнов Ю. Н. Соппротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – М. : Физматгиз, 1962. – 456 с.

166. Кузнецов Е. В. Разработка и внедрение вибрационной технологии для получения прецизионных изделий машиностроения : дис.

... канд. техн. наук : 05.16.04 / Кузнецов Евгений Викторович. – Днепропетровск, 1996. – 154 с.

167. Окерблом Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н. О. Окерблом. – М. : Машгиз, 1955. – 212 с.

168. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1961. – 538 с.

169. Применение вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах / О. И. Зубченко, А. А. Грузд, Г. Т. Орехов, А. Г. Состин // Автоматическая сварка. – 1974. – № 9. – С. 64–66.

170. Биргер И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.

171. Зинер К. Упругость и неупругость металлов / Зинер К. – М. : Иностранная литература, 1954. – 240 с.

172. Morton K. W. Material inhomogeneities in elasticity / Morton K. W. – London : Chapman&Hall. – 1993. – 286 p

173. Pastor M. Numerical modeling in geomechanics / M. Pastor, C. Tamagnini. – London : Kogan page limited, 2004. – 352 p.

174. Mase G. T. Continuum mechanics for engineers / G. T. Mase, G. E. Mase. – London : CRC Press LLC, 1999. – 380 p.

175. Деньщиков А. Ю. Создание математической модели материала, в котором происходит процесс вибрационного старения / А. Ю. Деньщиков, Г. И. Львов, А. Н. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 20. – С. 73-80.

176. Гусев В. А. Математика : справочные материалы / В. А. Гусев, А. Г. Мордкович. – М. : Просвещение, 1988. – 416 с.

177. Деньщиков А. Ю. Моделирование процесса снижения остаточных напряжений посредством вибрационной обработки (одноосные задачи) / А. Ю. Деньщиков, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : збірник наукових праць. Тематичний випуск № 8 : Динаміка та міцність машин», т. 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – С. 55–60.

178. Soukhojak A. N. Generalized rheology of active materials / A. N. Soukhojak, Y. M. Chiang // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 88, Issue 11. – P. 6902–6909.
179. Millis A. J. Phenomenological model of nuclear relaxation in the normal state of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ / Millis A. J. // *Physical Review*. – 1990. – В 42, Issue 1. – P. 167–178.
180. Борздыка А. М. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А. М. Борздыка, Л. Б. Гецов. – М. : Metallurgy, 1978. – 256 с.
181. Лепин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности / Г. Ф. Лепин. – М. : Наука, 1976. – 344 с.
182. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов / Феодосьев В. И. – М. : Высшая школа. – 1986. – 512 с.
183. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1976. – Т. 2: Физико-химическая теория пластичности. – 1976. – 416 с.
184. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1967. – 400 с.
185. Бидерман В. Л. Прикладная теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1970. – 416 с.
186. Огибалов П. М. Изгиб, устойчивость и колебания пластинок / П. М. Огибалов. – М. : МГУ, 1956. – 388 с.
187. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М. : Наука, 1965. – 560 с.
188. Овчаренко В. А. Расчет задач машиностроения методом конечных элементов / В. А. Овчаренко. – Краматорск : ДГМА, 2004. – 126 с.
189. Bath K. J. Finite element procedures / K. J. Bath. – New Jersey : Prentice-Hall, 1996. – 1050 p.
190. Smith L. M. Programming the finite element method / L. M. Smith, D. G. Griffiths. – 2nd ed. – New York : John Wiley & sons, 1988. – 478 p.
191. Sasahara H. FEM Analysis of Cutting Sequence Effect on Mechanical Characteristics in Machined Layer / H. Sasahara, T. Obikawa, T. Shirakashi // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1996. – Vol. 62, № 4. – P. 448–453.

192. Williamson R. L. Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic-metal interfaces. Part I.: Model description and geometrical effects / R. L. Williamson, B. H. Rabin, J. T. Drake // Journal of Applied Physics. – 1993. – Vol. 74, Issue 2. – P. 1310–1320.

193. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.

194. Finite Element Model for Residual Stress in Repair Welds / Z. Feng, X. L. Wang, S. Spooner, G. M. Goodwin, P. J. Maziasz, C. R. Hubbard, T. A. Zacharia // ASME Pressure Vessels and Piping Conference. – 1996. – № 327. – P. 119–126.

195. Agarakis J. E. Analytical modeling of thermal stress relieving in stainless and high-strength steel weldments / J. E. Agarakis, K. Masubuchi // Welding Journal. – 1984. – Vol. 63, № 6. – P. 187–196.

196. Сагалеви́ч В. М. Исследование снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях балочного типа вибрационной обработкой / В. М. Сагалеви́ч, С. А. Мезенцева, Г. Х. Насыров // Сварочное производство. – 1995. – № 7. – С. 15–18.

197. Деньщиков А. Ю. Моделирование процесса виброправки прокатных профилей / А. Ю. Деньщиков, А. И. Дрыга, Л. В. Кутовой, С. В. Подлесный // Вопросы вибрационной технологии : межвузовский сборник научных статей. – Ростов н/Д. : ДГТУ, 2001. – С. 131–136.

198. А. с. 1812223. Устройство для обработки изделий вибрацией / Скаковский В.Д., Чинахов А. В., Крауиньш П. Я. (СССР). – Оpubл. 30.04.93 ; Бюл. № 16.

199. Иориш Ю. И. Измерение вибрации / Ю. И. Иориш. – М. : Машгиз, 1956. – 404 с.

200. Галяш А. А. Определение частоты нагружения при низкочастотной виброобработке сварных конструкций / А. А. Галяш, К. И. Васильченко Г.П. Чернецов // Сварочное производство. – 1992. – № 8. – С. 35–36.

201. Пат. 5242512 US, МПК В06В 1/16. Method and apparatus for relieving residual stresses / W. H. Bagley , J. R. Rosbe, D. G. Wilson (US) № 851996. – Заявл. 13.03.92 ; опубл. 7.09.93. – 4 с.

202. Коновалов Е. Г. Измеритель остаточных напряжений (ИОН) / Е. Г. Коновалов, Г. Т. Орехов // ДАН БССР. – 1972. – № 11. – С. 35–39.

203. Сагалевич В.М. Устранение деформаций сварных балочных конструкций вибрацией/ В.М. Сагалевич, Н.Н. Завалишин, В.В. Нашивочников // Сварочное производство. – 1979. – №9. – С. 9-12.

204. Бойченко О.В. Релаксация остаточных напряжений в упрочненных деталях под действием изгибных колебаний/ Бойченко О.В., Мелешко И.В., Скиданенко В.И // Сб.трудов Всероссийск. научной конференции «Современные тенденции развития автомобилестроения в России», 2004, т.4, С.91-97.

Семенов Валентин Михайлович, Деньщиков Александр Юрьевич,
Подлесный Сергей Владимирович

Снижение остаточных напряжений в элементах конструкций
методом вибрационной обработки

Редактор
Компьютерная верстка

Подп. к печати Формат 60x84/16
Ризографич. печ. Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Тираж Заказ №

ДГМА, 84313, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72